

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL
CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CUENCA MESOZOICA
AREQUIPA EN PACHÍA (36v) Y PALCA (36x) MEDIANTE ANÁLISIS
MICROTECTÓNICO E INTEGRACIÓN CON INFORMACIÓN SÍSMICA DEL
SUBSUELO

Para optar el título de:
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTADO POR
Bach. IVAN HAGLER BECERRA VÁSQUEZ

ASESOR:
MCs. Ing. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI

CAJAMARCA, PERÚ

2017

AGRADECIMIENTO

Doy mi más profundo agradecimiento muy cordialmente a mi alma mater, la “Universidad Nacional de Cajamarca”, a los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica (EAPIG) por brindarme la oportunidad y facilitarme las herramientas y equipos necesarios para lograr mis objetivos.

Agradezco al Ing. Zenón Quispe Mamani; geólogo docente de la UNC por asesorar la presente tesis, corregirla y comentarla, al Ing. Rildo Rodríguez Mejía y al Dr. Aldo Alván De la Cruz por su disponibilidad y enseñanza en el desarrollo de la tesis; al Ing. Daniel Torres por el apoyo en el manejo de software, a Elvis Sánchez y Alexandra Benítez por su constante apoyo, y ante todo gracias por su amistad y consejos y por inculcarme ese interés en la investigación que me ayudaron a encaminarme en este trabajo.

Asimismo quiero agradecer al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT), Perú (Convenio No. 216-2015 INGEMMET-FONDECYT); por haber financiado esta tesis proporcionando todos los medios necesarios para la culminación de esta investigación.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Cesar Becerra Alva y Gloria Vásquez Burga por sus sabios consejos, su perseverancia, por el valor y esfuerzo mostrado para salir adelante y la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mí querida esposa Luz Roxana Rodrigo Campos y a mi precioso hijo Diego Alejandro Becerra Rodrigo, quienes son mi familia y el motor impulsador para la realización de esta tesis.

A mis preciosos hermanos Malena y Rodrigo por su apoyo moral, y ser ejemplo de amor y ternura.

A mi pequeño sobrino Franco por regalarme siempre una sonrisa y llenarme los días de alegría.

A mis amigos y colegas del INGEMMET, Marco Chumpitaz, Alan Santos Polo, Dante Soberón, Luis Coba; por su apoyo incondicional y amistad.

RESUMEN

La topografía de los Andes Centrales refleja el resultado de una dinámica marcada por el acortamiento y levantamiento que ha experimentado las rocas que conforman la parte occidental del continente Sudamericano entre los 15° y 24° S, lo cual nos hace pensar de cómo se originaron y cómo se comportaron las principales estructuras regionales durante el Mesozoico en Tacna. Este trabajo de tesis recoge las evidencias de paleoesfuerzos en las rocas mesozoicas que afloran en el departamento de Tacna (18°S) y que forman parte de lo que correspondió a la Cuenca Arequipa, con el objetivo de conocer el estilo de deformación durante el Mesozoico en estas latitudes, integrando con información sísmica del Offshore.

Se tomó en campo 38 Estaciones Microtectónicas (EM), analizadas e interpretadas en el Software FaultKin, posteriormente agrupadas de acuerdo a los patrones direccionales de paleoesfuerzos, y así reconstruir la configuración estructural de la Cuenca Arequipa durante el Mesozoico en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) en Tacna.

Estos estudios se han complementado con el análisis microestructural de 17 secciones delgadas representativas que han evidenciado microestructuras asociadas principalmente a esfuerzos diferenciales de régimen compresivo. Finalmente se integró con estudios sísmicos del offshore de Tacna, lo cual ha permitido interpretar el régimen distensivo dominante durante el Jurásico para la Cuenca Arequipa, el cual consiste en componentes tipo strike-slip (onshore) y componentes típicos de un régimen extensional (offshore).

La evolución tectónica de la Cuenca Arequipa es compleja y diversa; sin embargo, la actividad del SFI (Sistema de Fallas Incapuquio) desde sus inicios en el Jurásico inferior (donde comenzó a formarse la cuenca), con un dominante régimen distensivo dió lugar a la apertura de la cuenca, posteriormente en el Cretácico superior debido a la inversión tectónica ocurrida, el SFI se convirtió en fallas predominantemente inversas.

Esta tesis se enmarca en el Convenio N° 216-2015 entre el INGEMMET-FONDECYT y el proyecto de investigación GR41A de la Dirección de Geología Regional del INGEMMET.

Palabras clave: *Microtectónica, régimen tectónico, Cuenca Arequipa, microestructuras, esfuerzos, distensión, compresión, transcurrentes.*

ABSTRACT

The topography of the Central Andes reflects the result of a dynamic marked by the shortening and rise that has been experienced by the rocks that make up the western part of the South American continent between 15 ° and 24 ° S, which makes us think of how they originated and How the main regional structures behaved during the Mesozoic in Tacna. This work presents the evidence of paleoesfuerzos in Mesozoic rocks that appear in the department of Tacna (18 ° S) and are part of what corresponded to the Arequipa Basin, in order to know the style of deformation during the Mesozoic In these latitudes, integrating with offshore seismic information.

A total of 38 Microtectonic Stations (MS) were analyzed and interpreted in the FaultKin Software, later grouped according to the directional patterns of paleoesfuerzos, and thus to reconstruct the structural configuration of the Arequipa basin during the Mesozoic period in the Pachía Quadrangles (36v) And Palca (36x) in Tacna.

These studies have been complemented by the microstructural analysis of 17 representative thin sections that have evidenced microstructures associated mainly to compressive regime differential stresses. Finally, it was integrated with seismic studies from the offshore of Tacna, which has allowed to interpret the dominant distensive regime during the Jurassic period for the Arequipa Basin, which consists of strike-slipe (onshore) components and typical components of an offshore regime.

The tectonic evolution of the Arequipa Basin is complex and diverse; However, the activity of the SFI (Incapuquio Fault System) from its beginnings in the lower Jurassic (where the basin began to form), with a dominant distensive regime gave rise to the opening of the basin, later in the Upper Cretaceous due to The tectonic inversion occurred, the SFI became predominantly inverse faults.

This thesis is part of the Agreement No. 216-2015 between INGEMMET-FONDECYT and the GR41A research project of the Regional Geology Directorate of INGEMMET.

Key words: Microtectonic, tectonic regime, Arequipa basin, microstructures, stress, distension, compression, transcurrent.

CONTENIDO	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
CONTENIDO	v
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.2. BASES TEÓRICAS	6
2.2.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	6
2.2.2. ELEMENTOS DE UNA FALLA	8
2.2.3. TRANSPRESIÓN Y TRANSTENSIÓN	11
2.2.4. MODELO DE ANDERSON PARA FALLAS	11
2.2.5. ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO	13
2.2.6. PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA	18
2.2.7. SÍSMICA DE REFLEXIÓN	19
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	22
CAPÍTULO III.....	23
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN	23
3.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	23
3.1.2. UBICACIÓN POLÍTICA	24
3.1.3. ACCESOS A LA ZONA DE ESTUDIOS	24
3.2. TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	26
3.3. PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOPIACIÓN DE DATOS.....	26
3.3.1. ETAPA PRE-CAMPO, REQUERIMIENTO BIBLIOGRÁFICO.....	27
3.3.2. ETAPA DE CAMPO	27
3.3.3. ETAPA POST CAMPO	27
3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN	28

	Pág.
3.5. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	29
3.6. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS	29
3.7. CONTEXTO GEOLÓGICO	30
3.7.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	30
3.7.2. GEOMORFOLOGÍA.....	41
3.7.3. HIDROLOGÍA DE TACNA.....	43
3.7.4. CLIMA	44
3.8. CONTEXTO ESTRUCTURAL Y REGIONAL	45
3.8.1. SISTEMA DE FALLAS INCAPUQUIO (SFI)	45
3.8.2. FALLA CHALLAVIENTO.....	46
3.8.3. FALLA HUACANO	47
3.8.4. FALLA ESTIQUE PAMPA.....	47
3.8.5. FALLA PALQUILLA.....	48
3.8.6. FALLA INCAPUQUIO	48
3.8.7. FALLA PALCA.....	49
3.8.8. FALLA CAPLINA.....	50
3.8.9. FALLA JUNERATA	50
CAPÍTULO IV.....	51
4.1. TECTÓNICA	51
4.1.1. LOS ANDES PERUANOS.....	52
4.1.2. ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO Y DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS	54
4.1.3. CRITERIOS DE CAMPO PARA RECONOCER INDICADORES CINEMÁTICOS.....	55
4.2. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	56
4.2.1. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°1: CHULPAPALCA.....	57
4.2.2. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°2: JUNERATA	58
4.2.3. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°3: EL INGENIO	59
4.2.4. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°4: CAUSURI	61
4.2.5. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 5: ATASPACA – SECTOR OESTE	62
4.2.6. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°6: ATASPACA – SECTOR SUROESTE	63
4.2.7. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°7: HUACANO CHICO – SECTOR N	64
4.2.8. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°8: HUACANO CHICO – SECTOR NE.....	65
4.2.9. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°9: QUEBRADA TOCUCO SECTOR SE	67
4.2.10. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 10: CHUSCHUCO – SECTOR ESTE	68

	Pág.
4.2.11. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°11: QUEBRADA TOCUCO SECTOR CENTRAL	69
4.2.12. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 12: CHUSCHUCO – SECTOR NE.....	70
4.2.13. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 13: CHAÑAL	71
4.2.14. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 14: COPAPUQUIO	73
4.2.15. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 15: HUANUNE	74
4.2.16. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 16: MEDIAFLOR.....	75
4.2.17. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 17: CONDORINE	76
4.2.18. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 18: YANGANE	78
4.2.19. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 19: CHALLAVIENTO.....	79
4.2.20. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 20: ANCONSONTINE.....	80
4.2.21. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 21: HUACANO GRANDE	81
4.2.22. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 22: HUACANO GRANDE–SECTOR E.....	83
4.2.23. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 23: QUEBRADA TENINGUIRRE.....	84
4.2.24. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 24: MAL PASO – SECTOR NE	85
4.2.25. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 25: QUEBRADA TOCUCO A	86
4.2.26. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 26: QUEBRADA TOCUCO B.....	87
4.2.27. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 27: QUEBRADA TOCUCO C.....	89
4.2.28. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 28: QUEBRADA TOCUCO D	90
4.2.29. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 29: QUEBRADA TOCUCO E.....	91
4.2.30. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 30: QUEBRADA TOCUCO F	92
4.2.31. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 31: QUEBRADA TOCUCO G	94
4.2.32. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 32: TACATA.....	95
4.2.33. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 33: TALAME	96
4.2.34. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 34: PALQUILLA	97
4.2.35. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 35: INCAPUQUIO	98
4.2.36. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 36: TAUJA	100
4.2.37. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 37: MACHANI.....	101
4.2.38. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 38: MAL PASO NORTE	102
4.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN SECCIONES DELGADAS	104
4.3.1. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN SECCIONES DELGADAS....	107
4.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	117
4.4.1. PRIMERO EVENTO: ESFUERZO DISTENSIVO NO-SE (JURÁSICO INF - MEDIO) ..	120
4.4.2. SEGUNDO EVENTO: TRANSTENSIÓN N-S (BAJOCIANO-BATHONIANO).....	121
4.4.3. TERCER EVENTO: TRANSTENSIÓN E-O (JURÁSICO SUP-CRETÁCICO INF)	123

	Pág.
4.4.4. CUARTO EVENTO: COMPRESIÓN NO-SE (CRETÁCICO INF – CRETÁCICO SUP)	124
4.4.5. QUINTO EVENTO: TRANSPRESIÓN NNE (CRETÁCICO SUPERIOR-PALEÓGENO)	126
4.5. INTEGRACIÓN CON INFORMACIÓN SÍSMICA DEL SUBSUELO	127
4.5.1. LÍNEA SÍSMICA C-7050 (LS-1)	129
4.5.2. LÍNEA SÍSMICA C-7103 (LS-2)	131
4.5.3. LÍNEA SÍSMICA C-7090-6 (LS-3).....	133
CAPÍTULO V	136
5.1. CONCLUSIONES	136
5.2. RECOMENDACIONES	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación geográfica del área de estudios (zona ubicada entre los cuadrángulos de Pachía y Palca).....	23
Tabla 2: Tiempo y distancia entre las ciudades involucradas en el presente estudio.....	25
Tabla 3: Procedimiento y técnicas de recolección de datos.....	26
Tabla 4: Indicadores cinemáticos para la Estación Microtectónica Chulpapalca	57
Tabla 5: Parámetros estructurales de la EM Chulpapalca.....	58
Tabla 6: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Junerata.....	59
Tabla 7: Parámetros estructurales de la EM Junerata.....	59
Tabla 8: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica El Ingenio.....	60
Tabla 9: Parámetros estructurales de la EM El Ingenio.....	60
Tabla 10: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Causuri.....	61
Tabla 11: Parámetros estructurales de la EM Causuri.....	62
Tabla 12: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ataspaca – Sector O.....	62
Tabla 13: Parámetros estructurales de la EM Ataspaca - Sector Oeste.....	63
Tabla 14: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ataspaca–Sector SO.....	64
Tabla 15: Parámetros estructurales de la EM Ataspaca - Sector Suroeste.....	64
Tabla 16: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Chico-Norte	65
Tabla 17: Parámetros estructurales de la EM Huacano Chico – Sector norte.....	65
Tabla 18: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Chico-NE	66
Tabla 19: Parámetros estructurales de la EM Huacano Chico – Sector noreste.....	66
Tabla 20: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco SE	67
Tabla 21: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco – Sector Sureste.....	68

	Pág.
Tabla 22: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chuscuco - Este.....	68
Tabla 23: Parámetros estructurales de la EM Chuscuco - Sector Este.....	69
Tabla 24: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco - Central.	70
Tabla 25: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco - Sector central.	70
Tabla 26: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chuscuco – Sector Noreste.	71
Tabla 27: Parámetros Estructurales de la EM Chuscuco - Sector noreste.	71
Tabla 28: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chañal.	72
Tabla 29: Parámetros Estructurales de la EM Chañal.....	72
Tabla 30: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Copapuquio.	73
Tabla 31: Parámetros Estructurales de la EM Copapuquio.....	74
Tabla 32: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huanune.	74
Tabla 33: Figura 52: Parámetros Estructurales de la EM Huanune.	75
Tabla 34: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mediaflor.....	76
Tabla 35: Parámetros Estructurales de la EM Mediaflor.	76
Tabla 36: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Condorine.....	77
Tabla 37: Parámetros Estructurales de la EM Condorine.	77
Tabla 38: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Yangane.	78
Tabla 39: Parámetros Estructurales de la EM Yangane.	79
Tabla 40: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Challaviento.	79
Tabla 41: Parámetros Estructurales de la EM Challaviento.....	80
Tabla 42: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ancosontine.	81
Tabla 43: Parámetros Estructurales de la EM Ancosontine.	81
Tabla 44: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Grande.....	82
Tabla 45: Parámetros estructurales de la EM Huacano Grande.	82
Tabla 46: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Grande-Sector Este. ...	83
Tabla 47: Parámetros estructurales de la EM Huacano Grande-Sector Este.....	84
Tabla 48: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Teninguirre.	84
Tabla 49: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Teninguirre.	85
Tabla 50: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mal Paso - Sector NE.....	86
Tabla 51: Parámetros Estructurales de la EM Mal Paso-Sector NE.	86
Tabla 52: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco A.	87
Tabla 53: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco A.....	87
Tabla 54: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco B.	88
Tabla 55: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco B.	88

	Pág.
Tabla 56: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco C.	89
Tabla 57: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco C.	90
Tabla 58: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco D.	90
Tabla 59: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco D.	91
Tabla 60: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco E.	92
Tabla 61: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco E.	92
Tabla 62: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco F.	93
Tabla 63: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco E.	93
Tabla 64: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco G.	94
Tabla 65: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco G.	95
Tabla 66: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Tacata.	95
Tabla 67: Parámetros estructurales de la EM Tacata.	96
Tabla 68: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Talame.	97
Tabla 69: Parámetros Estructurales de la EM Talame.	97
Tabla 70: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Palquilla.	98
Tabla 71: Parámetros Estructurales de la EM Palquilla.	98
Tabla 72: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Incapuquio.	99
Tabla 73: Parámetros Estructurales de la EM Incapuquio.	100
Tabla 74: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Tauja.	100
Tabla 75: Parámetros Estructurales de la EM Tauja.	101
Tabla 76: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Machani.	102
Tabla 77: Parámetros Estructurales de la EM Machani.	102
Tabla 78: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mal Paso Norte.	103
Tabla 79: Parámetros Estructurales de la EM Mal Paso Norte.	103
Tabla 80: Ubicación y características de las muestras de campo para estudios microestructurales.	107
Tabla 81: Resumen de estaciones microtectónicas (EM) y parámetros vectoriales de los esfuerzos.	118
Tabla 82: Eventos tectónicos regionales responsables de la evolución de la Cuenca Arequipa.	119
Tabla 83: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al primer evento tectónico regional (distensión NO-SE).	120
Tabla 84: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al segundo evento tectónico regional (Transtensión N-S).	122

Tabla 85: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al tercer evento tectónico regional (transtensión E-O).	124
Tabla 86: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al cuarto evento tectónico regional (Compresión NO-SE).	125
Tabla 87: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al quinto evento tectónico regional (Transpresión NEE).	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de fuerzas de superficie (según Martínez, 2003).	7
Figura 2: Esfuerzo que actúa sobre una superficie inclinada (Martínez, 2003).	8
Figura 3: Elementos estructurales de una falla geológica (modificado de Coe, 2010).	9
Figura 4: Tipos de fallas ideales (Camargo, 2015).	10
Figura 5: Modelos de transpresión y transtensión conectados por estilos de compresión, strike slip (rumbo) y extensión (Fossen, 2010).	11
Figura 6: Modelo de Anderson para clasificar fallas (modificado de Rowland, 2007).	12
Figura 7: Block diagrama derivado del modelo Andersoniano y su relación con la representación estereográfica en FaultKin (modificado de Fossen, 2010).	13
Figura 8: Estructuras compatibles (Fallas inversas, normales y pliegues) para una compresión regional NE-SO de un sistema de rumbo sinistral (adaptado de McClay & Bonora, 2001).	14
Figura 9: Deformación de cizalla simple de un sistema de rumbo dextral (Waldron, 2005).	14
Figura 10: Fallas normales e inversas compatibles para una compresión regional N-S en un sistema de rumbo dextral. Asimismo, se observa estructuras que no son compatibles (en círculos rojos punteados) con esta deformación (adaptado de McClay & Bonora, 2001).	15
Figura 11: Modelo de estructuras tipo “Riedel” aplicado para la definición de la generación de estructuras asociadas a un mismo sistema estructural (modificado de Petit, 1987).	15
Figura 12: Esquema de diedros rectos en una falla en proyección estereográfica y block diagrama de fallas normales e inversas (Modificado de De Vicente et al., 1992).	16
Figura 13: Estructuras tectónicas en (A) a escala centimétrica y en (B) a escala métrica, ambas en los campos de Staffjord, mar del norte Las dos estructuras cumplen el concepto de auto semejanza relacionada a la geometría fractal (Fossen, 2010).	18
Figura 14: Proyección estereográfica de la esfera y falsilla de Wulff (Tomás et al., 2002).	18
Figura 15: Bases de la sísmica de reflexión, esquema representativo de Zlotnik et al. (2002).	19

Figura 16: Las terminaciones estratales en el análisis de líneas sísmicas (modificado de van Wagoner et al., 1988).	21
Figura 17: Patrones de sedimentación obtenido de reflectores sísmicos (modificado de Mitchum et al., 1977).	22
Figura 18: Mapa de ubicación de la zona de estudios.	24
Figura 19: Accesos, aéreo y terrestre para llegar a la ciudad de Tacna desde Lima.	25
Figura 20: Accesos desde Tacna a los distritos de Pachía y Palca.	25
Figura 21: Afloramiento de gneis con bandeamiento definido perteneciente al Complejo Basal de la Costa, en la Quebrada Huacano Grande (387243E, 8047449N).	31
Figura 22: A) Limolitas negras fisibles correspondientes al Grupo Ambo. B) Fósil de bivalvo en limolitas negras. C) Fósil de una planta, característico del Grupo Cabanillas que fueron estudiados y descritos anteriormente por Monge & Cervantes., 2000; Pino et al., (2002).	32
Figura 23: En A) Lavas andesíticas pertenecientes a la Formación Chocolate al sur de Causuri, formando estructuras columnares (disyunción columnar) debido al rápido enfriamiento de estas lavas. B) y C) Deformación dúctil en lavas afaníticas (plegamientos) (400371E/ 8035153N).	33
Figura 24: A) Afloramientos de la Formación Pelado. B) Calizas negras con abundantes nódulos. C) Intercalaciones de calizas grises y limolitas, con presencia de ammonites de ~25cm de diámetro. D) Calizas mudstone grises con abundante bioturbación (404562E/8031372N).	34
Figura 25: A) y B) Estratos de areniscas calcáreas intercaladas con limolitas gris oscuras. C) Laminación paralela de calizas wackestone de color gris oscuro. (404562E/8031372N).	35
Figura 26: Afloramiento del Grupo Yura, en el Cerro Chachacumane (al Este de la localidad de Chulpapalca), donde se observa todas las formaciones pertenecientes a este Grupo.	36
Figura 27: Afloramientos que conforman el Grupo Yura, donde en las imágenes A, B, C, D y E corresponden a las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani.	38
Figura 28: Rocas volcánicas de composición andesítica, de color rojizo en las cuales se registran macro estrías de falla (Mega-Mullons). (UTM 388055E/ 8053866N).	49
Figura 29: A) Falla inversa donde andesitas de la Fm. Chocolate está sobre tobas de la Fm. Huaylillas. B) Material triturado (panizo) producto de la falla. C) Muestra tomada en el contacto fallado, previamente orientada para estudios en secciones delgadas, (UTM 402442E/ 8029274N).	49
Figura 30: Al este del Poblado de Caplina se tiene afloramientos que atestiguan la actividad de la Falla Caplina (UTM 401764E, 8043613N).	50
Figura 31: Morfología Andina, producto de la subducción de la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana (tomado de Sébrier et al., 1988).	52

Figura 32: Eventos tectónicos de la margen peruana entre el Mesozoico y el Cenozoico (Modificado de Jaillard, 1999).....	53
Figura 33: Criterios cinemáticos para determinar el movimientos de fallas (Petit, 1987).....	54
Figura 34: Criterios para la determinación de la cinemática en planos de falla. A) Criterio de “subir la escalera” connota las fracturas tipo Riedel. B) Riedel sintético (R) y antitético (R [^]) en un plano de falla. C) Criterio de “bajar la escalera” genera fibras minerales o Slickenfibers. D) Cristalización de calcita en un plano de falla en calizas. E) Falla sinistral en microescala. F) Capas de caliza que están desplazadas con un movimiento lateral izquierdo.	55
Figura 35: Tectoglifos para definir el sentido de movimiento de una falla (Quispe, 2006).....	56
Figura 36: Lavas andesíticas de la Formación Chocolate silicificadas por la intrusión del Batolito Challaviento.	57
Figura 37: Ploteo de estrías de falla en la EM - 1	58
Figura 38: Calizas mudstone de la Formación Pelado afectadas por la Falla Junerata.	58
Figura 39: Ploteo de estrías de falla en la EM – 2.....	59
Figura 40: Rocas volcánicas andesíticas atribuibles a la Formación Chocolate afectadas por la cinemática de la Falla Junerata.....	60
Figura 41: Ploteo de estrías de falla en la EM - 3.	60
Figura 42: Estrías de falla en andesitas porfídicas de la Formación Chocolate en Causuri.	61
Figura 43: Ploteo de estrías de falla en la EM – 4.....	61
Figura 44: Slickensides en tonalitas del Batolito Challaviento en Ataspaca.....	62
Figura 45: Ploteo de estrías de falla en la EM – 5.....	63
Figura 46: Estrías de falla en andesitas afaníticas de la Formación Chocolate en Ataspaca.	63
Figura 47: Ploteo de estrías de falla en la EM – 6.....	64
Figura 48: Estrías de falla en Milonitas, sector Huacano - Carretera a Tarata.....	65
Figura 49: Ploteo de estrías de falla de la EM - 7.	65
Figura 50: Estrías de falla en rocas gneissíticas del Complejo Basal de la Costa.....	66
Figura 51: Ploteo de estrías de falla de la EM-8.	66
Figura 52: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.	67
Figura 53: Ploteo de estrías de falla de la EM-9.	67
Figura 54: Estrías de falla paralelas a la estratificación en areniscas de la Fm. Hualhuani.	68
Figura 55: Ploteo de estrías de falla de la EM-10.	69
Figura 56: Estrías de falla en areniscas de la Formación Hualhuani.....	69
Figura 57: Ploteo de estrías de falla de la EM-11.	70
Figura 58: Falla subvertical en areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani.	71

	Pág.
Figura 59: Ploteo de estrías de falla en la EM-12.	71
Figura 60: Estrías en la falla de bajo ángulo, afectando a rocas de la Unidad Samanape, Chañal....	72
Figura 61: Ploteo de estrías de falla de la EM-13.	72
Figura 62: Sistema Riedel en areniscas de la Formación Puente en Copapuquio.	73
Figura 63: Ploteo de estrías de falla en la EM-14.	73
Figura 64: Estrías de falla en calizas de la Formación Socosani.....	74
Figura 65: Ploteo de estrías de falla de la EM-15.	75
Figura 66: Estrías de falla en lavas andesíticas de la Formación Chocolate.	75
Figura 67: Ploteo de estrías de falla de la EM-16.	76
Figura 68: Estrías de falla en andesitas afaníticas de la Formación Chocolate.	77
Figura 69: Ploteo de estrías de falla de la EM-17.	77
Figura 70: Estrías de falla es andesitas porfídicas de la Formación Chocolate.....	78
Figura 71: Ploteo de estrías de falla de la EM- 18.	78
Figura 72: Estrías de falla afectando rocas granodioríticas del Batolito Challaviento.....	79
Figura 73: Ploteo de estrías correspondientes a la EM-19.	80
Figura 74: Estrías de falla en granitos del Batolito Challaviento.....	80
Figura 75: Ploteo de estrías de falla correspondiente a la EM-20.	81
Figura 76: Estrías de falla en gneis del Complejo Basal de la Costa.	82
Figura 77: Ploteo de estrías de falla de la EM-21.	82
Figura 78: Estrías de falla en rocas gnésicas del Complejo Basal de la Costa.....	83
Figura 79: Ploteo de estrías de falla de la EM-22.	83
Figura 80: Estrías de falla en andesitas violáceas de la Formación Matalaque.....	84
Figura 81: Ploteo de estrías de falla en la EM-23.	85
Figura 82: Milonitas silicificadas afectadas por la Falla Incapuquio.	85
Figura 83: Ploteo de estrías de falla de la EM-24.	86
Figura 84: Estrías de falla en arenisca de la Formación Hualhuani.	87
Figura 85: Ploteo de estrías de la EM-25.	87
Figura 86: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.	88
Figura 87: Ploteo de estrías de falla en la EM-26.	88
Figura 88: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.	89
Figura 89: Ploteo de estrías de falla de la EM-27.	89
Figura 90: Estrías de un movimiento sinistral en areniscas de la Formación Hualhuani.	90
Figura 91: Ploteo de estrías de falla en la EM-28.	91
Figura 92: Estrías de falla con movimiento inverso en areniscas de la Formación Hualhuani.	91

	Pág.
Figura 93: Ploteo de estrías de falla de la EM-29.	92
Figura 94: Estrías de falla con movimiento sinistral en areniscas de la Formación Hualhuani.	93
Figura 95: Ploteo de estrías de falla de la EM-30.	93
Figura 96: Estrías de una falla inversa en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.....	94
Figura 97: Ploteo de estrías de falla de la EM-31.	94
Figura 98: Estrías de falla dextral en tobas piroclásticas de la Formación Tarata.	95
Figura 99: Ploteo de estrías de falla en la EM-32.	96
Figura 100: Plano de falla dextral en rocas volcánicas de la Formación Matalaque.....	96
Figura 101: Ploteo de estrías de falla de la EM-33.	97
Figura 102: Plano de una falla normal en tobas líticas de la Formación Matalaque.....	98
Figura 103: Ploteo de estrías de falla de la EM-34.	98
Figura 104: Estrías de falla en Milonitas silicificadas.	99
Figura 105: Ploteo de estrías de falla de la EM-35.	99
Figura 106: Estrías de falla con movimiento sinistral, en areniscas de la Grupo Cabanillas.	100
Figura 107: Ploteo de estrías de falla de la EM-36.	101
Figura 108: Estrías de una falla normal en areniscas verdosas del Grupo Cabanillas.	101
Figura 109: Ploteo de estrías de falla de la EM-37.	102
Figura 110: Estrías de falla en milonitas silicificadas.....	103
Figura 111: Ploteo de estrías de falla de la EM-38.	103
Figura 112: Recolección de muestras de campo orientadas, para su posterior análisis microestructural en secciones delgadas.....	104
Figura 113: Tratamiento de las 17 muestras destinadas para análisis microestructural en secciones delgadas, en el Laboratorio de Microscopia de Ingemmet.....	105
Figura 114: Observación y análisis microestructural en secciones delgadas empleando microscopio petrográfico Leica.	105
Figura 115: Ubicación y distribución espacial de 17 muestras orientadas en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x).	106
Figura 116: Zonas de dilatación en la muestra GR41A-16-16.....	108
Figura 117: Splaying (cola de caballo) en la muestra GR41A-16-17	108
Figura 118: Fringe Structure (sombras de presión) en la muestra GR41A-16-18.....	109
Figura 119: Splaying Conjugado en la muestra GR41A-16-19.	109
Figura 120: Zonas de cizalla en la muestra GR41A-16-36.	110
Figura 121: Fracturas en reja y clivaje de biotitas en la muestra GR41A-16-37.	110
Figura 122: Pseudotaquillitas en la muestra GR41A-16-45.....	111

	Pág.
Figura 123: Boudinage en la muestra GR41A-16-46.....	112
Figura 124: Estilolitas en la muestra GR41A-16-47.....	112
Figura 125: Bandeamiento de cristales de cuarzo en la muestra GR41A-16-48.....	113
Figura 126: Macla polisintética en plagioclasas de la muestra GR41A-16-49.....	113
Figura 127: Recristalización y bandeamiento de cristales en la muestra GR41A-16-50.....	114
Figura 128: Microestructuras tipo "Mica Fish" en la muestra GR41A-16-61.....	114
Figura 129: Fracturas anastomasadas en la muestra GR41A-16-62.....	115
Figura 130: Fracturas de tensión en la muestra GR41A-16-81.....	115
Figura 131: Cataclastitas en la muestra GR41A-16-83.....	116
Figura 132: Zona de recristalización en la muestra GR41A-16-85.....	116
Figura 133: Agrupación de las estaciones 5, 6, 11 y 24. En la figura de la izquierda se representa la gráfica de los planos de falla, estrías y los ejes de máxima compresión (σ_1), intermedia (σ_2) y mínima (σ_3); a la derecha, representación estadística de los diedros rectos (en rojo los diedros que se encuentran en tensión y en blanco los diedros que se encuentran en compresión), 1 y 3 son los ejes de compresión y extensión respectivamente.....	120
Figura 134: Agrupación de las estaciones microtectónicas 2, 4, 9, 12, 16, 18, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 38; que dan como resultante un evento transtensivo.....	122
Figura 135: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 1, 8, 15, 17, 25, 32, 35, 37, que dan en promedio un régimen transtensivo.....	124
Figura 136: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 10, 21, 26, 27, 31, 36, que dan como resultado un régimen netamente compresivo.....	125
Figura 137: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 3, 7, 13, 14, 22, 29, que dan como resultado un régimen transcurrente.....	126
Figura 138: Mapa de líneas sísmicas del offshore de la margen sur peruana.....	127
Figura 139: Mapa de las tres líneas sísmicas correspondientes a la margen costera del Departamento de Tacna.....	128
Figura 140: Línea Sísmica C-7050, con orientación O-E y casi perpendicular a la margen costera de Tacna.....	129
Figura 141: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7050.....	129
Figura 142: Semi-graben interpretados de la Línea Sísmica C-7050, correspondientes a una tectónica extensional.....	130
Figura 143: Línea Sísmica C-7103 con orientación SO – NE, perpendicular a la margen costera de Tacna.....	131
Figura 144: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7103.....	131

Figura 145: Hemigrabens interpretados de la Línea Sísmica C-7103, correspondientes a una tectónica extensional.	132
Figura 146: Línea Sísmica C-7090-6 con orientación NO – SE, paralela con la margen costera...	133
Figura 147: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7090-6.....	133
Figura 148: Estructuras en “Flor Positiva” correspondientes al Jurásico.....	134
Figura 149: Evolución tectónica de la cuenca mesozoica Arequipa en la región de Tacna.....	136
Anexos.....	

Anexo N° 1

FORMATOS PARA ESTUDIO MICROESTRUCTURAL EN SECCIONES DELGADAS

Anexo N° 2

MAPAS

Mapa 01: Mapa de Ubicación y accesos

Mapa 02: Mapa Geomorfológico

Mapa 03: Mapa Hidrológico

Mapa 04: Mapa Geológico

Mapa 05: Mapa Geológico de la Era Mesozoica

Mapa 06: Mapa Estructural

Anexo N°3

COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS

Columna 01: Columna estratigráfica generalizada de Pachía – Palca.

Columna 02: Columna estratigráfica de la Era Mesozoica en Pachía y Palca.

Anexo N°4

PERFILES GEOLÓGICOS

Perfil N° 01: Perfil geológico A-A´ de dirección SO – NE.

Perfil N° 02: Perfil geológico B-B´ de dirección SO – NE.

Anexo N°5

MAPAS DE LÍNEAS SÍSMICAS

LS 01: Mapa de la Línea Sísmica C-7050

LS 02: Mapa de la Línea Sísmica C-7103

LS 03: Mapa de la Línea Sísmica C-7090-6

ABREVIATURAS

FONDECYT: Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica.

INGEMMET: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

UTM: Universal Transversal Mercator

GR41A: Código del Proyecto del área de Geología Regional de INGEMMET que estudia la Cuenca Sedimentaria Arequipa.

NNE: Nor noreste

SE: Sureste

SO: Suroeste

NO: Noroeste

NNO: Nor noroeste

SFI: Sistema de Fallas Incapuquio; SFCLLI (Sistema de Fallas Cincha Lluta Incapuquio)

EM: Estación Microtectónica

M: Muestra de campo para análisis estructural.

U-Th/He: Método radiométrico de datación Uranio – Torio en Helio.

D_x : Falla Dextral.

S_x : Falla Sinistral.

I_x : Falla Inversa.

N_x : Falla Normal.

$I_x D_x$: Falla Inversa con componente dextral.

$I_x S_x$: Falla Inversa con componente sinistral.

$N_x D_x$: Falla Normal con componente dextral.

$N_x S_x$: Falla Normal con componente sinistral.

MINERALES

FPs: Feldespatos

PLGs: Plagioclasas

OXsFe: Óxidos de Hierro

PXs: Piroxenos

CBs: Carbonatos

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El área de trabajo se sitúa en el departamento de Tacna, ubicada el extremo sur del Perú (al sur de 17°S). Políticamente, limita con el departamento de Puno por el norte, por el noroeste con el departamento de Moquegua y por el este con la frontera con Chile y con el volcán Tacora.

El control estructural en Tacna está conformado principalmente por un conjunto de fallas con comportamiento cinemático similar denominado como Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio (SFCLLI) definidos por Vicente (1989) y Jacay et al., 2002. Los primeros estudios regionales sobre la geología regional de esta zona fueron realizados por Wilson & García (1962), los cuales definieron estas fallas como un sistema con dirección predominantemente NO-SE con componentes inversos. Posteriormente Jaén (1965) propuso agrupar estas fallas como un solo grupo (Fallas Incapuquio) y la consideró como un sistema de fallas regionales reconocido y cartografiado en todo el flanco oeste de la Cordillera Occidental del sur de Perú, el cual se prolonga hasta el norte de Chile (Cordillera de la Costa de Chile, García & Hérail, 2004).

El estudio microtectónico en rocas mesozoicas en Tacna no ha sido ampliamente analizado en términos evolutivos, dado que al discriminar las evidencias registradas en rocas mesozoicas y en las rocas cenozoicas, debe sugerir episodios geodinámicos marcadamente distintos (por ejemplo, McClay, 1990; McClay & Bonora, 2001).

Por otro lado, al integrar lo interpretado en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) con información sísmica del subsuelo en el offshore de Tacna, su relación estructural se verá completada y se podrá deducir la edad relativa de las estructuras. El estudio microtectónico por medio de secciones delgadas permitirá determinar la cinemática y dinámica de esfuerzos como complemento a las mediciones de campo.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La síntesis de la problemática se puede expresar formulando dos principales preguntas:

- ¿Cómo se originaron y desarrollaron las estructuras tectónicas en las rocas de edad Mesozoico en Tacna?
- ¿Cuál es su significado geodinámico al integrarlo e interpretarlo con información sísmica del subsuelo (offshore de Tacna)?

OBJETIVOS

GENERAL

- Caracterizar estructuralmente la Cuenca Mesozoica Arequipa en Pachía (36v) y Palca (36x) mediante análisis microtectónico e integración con información sísmica del subsuelo (offshore) en Tacna.

ESPECÍFICOS

- Clasificar las estructuras dominantes en función a su origen.
- Realizar estaciones de Microtectónica.
- Elaborar diagramas de esfuerzos.
- Relacionar los eventos cinemáticos con la información de líneas sísmicas del offshore de Tacna.

ACADÉMICOS

- Cumplir con uno de los requisitos para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo.
- Tratar de aportar a la geociencia Peruana conocimientos para entender la evolución de los Andes desde el Mesozoico.

FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Las estructuras principales en las rocas de edad Mesozoica en Tacna, son producto de esfuerzos tectónicos principales de dirección NE-SO, los cuales obedecen al sistema andino o estructuras con dirección andina, las cuales plegaron y fracturaron las unidades litológicas, en eventos tectónicos compresivos post – Cretácicos originando fallas normales e inversas a lo largo de su evolución, integrando con la información sísmica del offshore.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Se requiere definir la evolución geodinámica de las rocas del Mesozoico, y contrastarlas con lo investigado o lo que se conoce sobre la evolución de las rocas durante el acortamiento Andino (Eoceno?, Oncken et al., 2006). Esta problemática se suma a la carencia de información concerniente al análisis microtectónico de rocas de edad Mesozoico en Tacna y se complica con la superposición de marcadores cenozoicos.

Desde un punto de vista geocientífico, industrial y social, permitirá calificar, cuantificar y asociar las estructuras tectónicas que afectaron las rocas de edad Mesozoico.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo I: Introducción, se presenta el contexto del problema a resolver (caracterizar estructuralmente la Cuenca Arequipa en el Mesozoico en Tacna) conjuntamente con sus objetivos e hipótesis; además se sustenta la justificación e importancia de la investigación.

Capítulo II: Marco Teórico, un compendio de antecedentes, estudios tectónicos, estructurales, y estratigráficos realizados en la zona de Tacna y bases teóricas en los que se fundamenta la investigación.

Capítulo III: Materiales y Métodos, muestra la ubicación geográfica donde se realiza la investigación, además describe la metodología a utilizar; así como los procedimientos para la toma de datos microestructurales en campo y el contexto geológico – estructural.

Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados, se realiza con el criterio microtectónico de los diedros rectos; luego los datos se valida y procesa con el software FaultKin, posteriormente se interpreta para definir un modelo de la configuración estructural de la Cuenca Arequipa en Tacna y se discute con las teorías referenciales a la zona de estudios.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones, se verifican la coherencia con los objetivos planteados, y es la síntesis de los resultados obtenidos en la investigación. Las recomendaciones más importantes repercute en la aplicación de dataciones radiométricas en fallas con el método (U-Th)/He.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

En términos generales los primeros aportes en los estudios regionales fueron realizados por Barúa (1961) (en Wilson & García, 1962), quien cartografió la Falla Incapuquio (como una sola) en los alrededores de Toquepala. Posteriormente:

- **Wilson & García (1962)**. En trabajos efectuados por la Comisión de la Carta Geológica Nacional, lo describieron como “Sistema de Fallas de Incapuquio” (SFI), en el área nororiental del cuadrángulo de Pachía (36v) y occidental de Palca (36x) e indicaron que la falla principal es continuación al sureste de la falla que Barúa (1961) había descrito.
- **Carlotto et al. (2009) y Mamani et al. (2010)**. Sostienen que aparentemente se trata de una provincia tectónica que cubre una gran parte del Perú meridional; sin embargo, mediante su descripción de dominios geotectónicos, sugirieron que cada bloque en el sur de Perú tiene comportamiento geodinámico distinto en función a la composición de su basamento. Las fallas importantes reconocidas en Tacna, pertenecientes a este sistema son las fallas de Incapuquio, Challaviento y Calientes.
- **Wilson & García (1962)**. Sostienen que la influencia de la actividad del Sistema de Fallas Cincha Lluta Incapuquio (SFLLI) es muy amplia y a la vez, bastante compleja, puesto que contiene fallas activas e inactivas a lo largo de su historia geológica, en varios lugares se encuentra asociados con las fallas ciertos cuerpos de una roca ígnea acida, de textura microcristalina, que aparentemente tiene la forma de dique. Los mapas geológicos del Perú a escala 1:100 000 que realizó la Comisión Carta Geológica Nacional en el Sur del Perú, muestra la asociación estrecha que existe entre diques y fallas. Ellos sugirieron que esta falla es del tipo transcurrente y considera que su movimiento principal fue en sentido horizontal debido al cual se habría producido los

pequeños pliegues de arrastre que existen en ambos lados de la falla con ejes dispuestos a menos de 45° con respecto al plano de fracturamiento.

- **Vicente et al. (1979)**. En su trabajo: “El sobre-escurrimiento de Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor andino al NW de Arequipa (1979)”, estos autores interpretaron un sobre-escurrimiento denominado como Cincha-Lluta en el departamento de Arequipa, el cual presenta un alcance longitudinal en sentido NO-SE de aproximadamente 25 km y afecta estructuralmente a las rocas del Macizo de Arequipa, las cuales, según estos autores, se sobreponen a rocas jurásicas.
- **Jacay et al. (2002)**. Publicaron la “Caracterización Estructural del Sistema de Fallas Incapuquio en el Sur del Perú”; el cual estudia el sistema estructural en Palca, y plantea que el Sistema de Fallas Incapuquio es un sistema estructural de carácter regional con rumbo sureste-noroeste (SE-NO). Se extiende sobre los departamentos de Tacna y Moquegua a lo largo de 140 km, con un ancho de 4 km como máximo (Jacay et al., 2002). En el departamento de Tacna es conocido como Sistema de Fallas Incapuquio y Challaviento, mientras que en su extensión hacia el noroeste, en el departamento de Moquegua, es conocida bajo el nombre de fallas Incapuquio, Micalaco y Capillune.
- **Jacay et al. (2002) y Pino et al. (2004)**. Publican en sus trabajos realizados en el área noroeste de Palca, el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) forma un rombo estructural asimétrico que corresponde a una estructura en flor positiva, y esta bordeado por tectonitas producidas por la actividad de fallas asociadas. Este rombo estructural representa un primer bloque con mayor exhumación asumida, donde aflora el basamento metamórfico. Estas características estructurales y la asimetría del rombo evidencian que se trata de un sistema transcurrente sinistral, que funciona principalmente en forma traspresiva (Jacay et al., 2002; Pino et al., 2004; Sempere et al., 2002).
- **Acosta et al. (2008)**. Consideraron que, estructuralmente, la zona de estudio está afectada por dos sistemas de fallas principales, las fallas principales del sistema NO-SE conformados por las fallas Calientes, Las peñas, Incapuquio, Palca, Chari y Challaviento, presentan buzamiento subvertical entre 70° y 75° , con una vergencia hacia el SO con componente sinistral, mientras que un Sistema de Fallas NE-SO se presenta ocasionalmente con muy reducidas evidencias, tanto así que solamente podemos hablar de lineamientos más significativos reflejados en la topografía (Por ejemplo el

lineamiento NE-SO de Calientes). Estudios posteriores mencionan que la Falla Cerro Negro, junto con la Fallas Incapuquio, Hornune y Caplarcuna forman una estructura romboédrica (Acosta et al., 2011).

- **Acosta et al. (2010).** Publicaron “Actividad tectónica del Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio durante la evolución de la Cuenca Arequipa en el Jurásico”, estos autores afirman la actividad tectónica distensiva para el Sistema Cincha-Lluta-Incapuquio durante el Jurásico, relacionándose con el emplazamiento del arco volcánico Chocolate que sirvieron de aporte para el Grupo Yura en Tacna.

2.2.BASES TEÓRICAS

2.2.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los geólogos estructuralistas utilizan el análisis estructural en planos de falla con la finalidad de identificar y recoger la mayor cantidad de datos que den información acerca de la historia estructural de una región. Para tal fin se aplica el análisis cinemático y dinámico propuesto por Rowland (2007).

El análisis estructural está constituido por:

- **Análisis descriptivo:** identificación, observación, descripción geométrica de los cuerpos rocosos (desde este punto de vista de su clasificación en diversos grupos de rocas), análisis de la estructura y sus elementos estructurales.
- **Análisis Cinemático:** Interpretación de la deformación, reconstruye los movimientos de las partículas del cuerpo original, describir los desplazamientos (transcurrente, normal o inverso) que dan lugar a la formación de una estructura.
- **Análisis Dinámico:** Establecer un modelo de esfuerzo, reconstruye los esfuerzos que dieron origen a la deformación, su dirección y su magnitud (Martínez, 2003).

2.2.1.1. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN

La deformación de una roca (por ejemplo, cizalla pura, de corte simple, etc.) está relacionado directamente con el esfuerzo, y esto se explica cuando las magnitudes y las orientaciones de los esfuerzos principales se conocen. Pero esto no es así en general, cuando la información de los esfuerzos se combina con estructuras observables en rocas

deformadas por lo general da más información acerca del tipo de deformación de un esfuerzo puntual (Fossen, 2010).

a) Fuerza: Definición, tipos y unidades de medida

Se define fuerza como una magnitud vectorial que tiende a producir un cambio en el movimiento (deformación) de un cuerpo o en su estructura interna, es decir, tiende a producir una deformación. Debido a su carácter vectorial, varias fuerzas actuando sobre un mismo punto pueden combinarse o sumarse en una sola y, similarmente, una fuerza puede considerarse que está compuesta de varias y puede descomponerse en ellas. Hay dos tipos de fuerzas: (i) de cuerpo (o másicas) y (ii) de superficie (Ramsay, 1977). En (i) Las fuerzas del cuerpo o másicas (“*body forces*”) están en relación directa con la masa del cuerpo al cual se aplican, aunque su origen puede ser debido a causas externas. Las fuerzas de superficie se subdividen a la vez en simples y compuestas (Fig. 1).

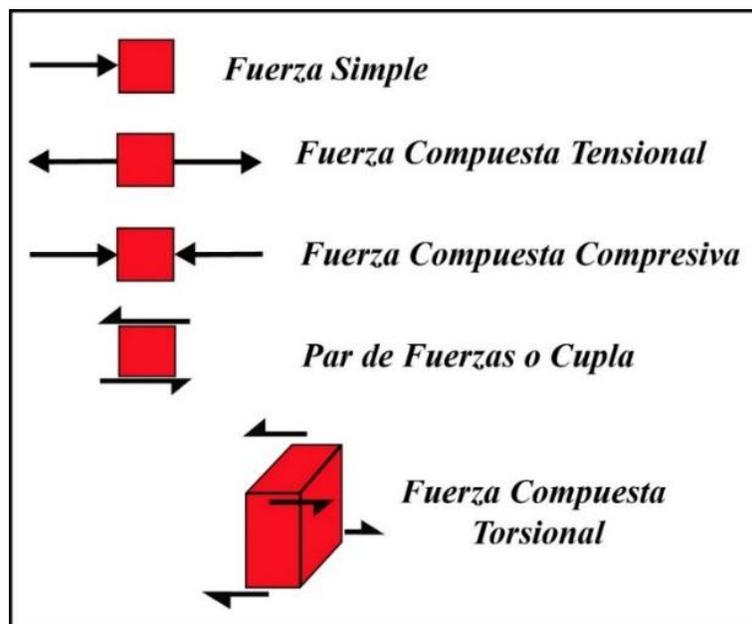


Figura 1: Tipos de fuerzas de superficie (según Martínez, 2003).

b) Esfuerzo: Definición y unidades de medida

El esfuerzo (“*stress*”) se define como la fuerza por unidad de superficie que soporta o se aplica sobre un plano cualquiera de un cuerpo, y da una medida de la intensidad de la reacción de dicho cuerpo rocoso que se apoya sobre otro (Ramsay, 1977). Es decir, es la relación entre la fuerza aplicada y la superficie: $(\frac{F}{S})$, que es el esfuerzo.

Tipos de Esfuerzo: Presión Litostática y esfuerzos debidos a fuerzas de superficie.

En Geología, nos interesan los esfuerzos causados en las rocas por la gravedad y los que son causados por fuerzas independientes de la masa del cuerpo en cuestión, es decir, fuerzas de superficie. La gravedad crea el esfuerzo llamado *presión litostática*, que es el esfuerzo que sufre un determinado punto de la tierra debido al peso de las rocas que tiene encima (Fig. 2). La presión litostática se calcula con la fórmula:

$$P_L = \rho \cdot g \cdot z$$

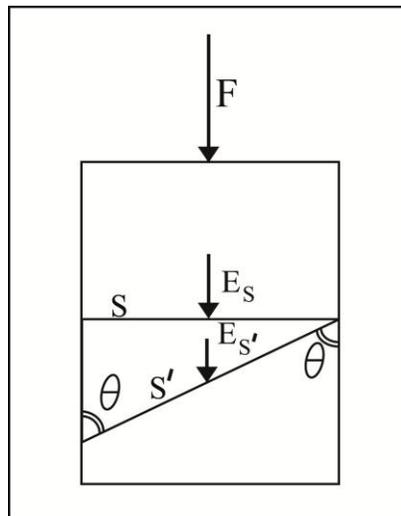


Figura 2: Esfuerzo que actúa sobre una superficie inclinada (Martínez, 2003).

Donde ρ es la densidad media de las rocas que hay por encima del punto, g es el valor de la aceleración de la gravedad y z la profundidad.

Al geólogo estructuralista le interesa especialmente el factor tiempo, le importa conocer que esfuerzos causarán rotura o deformación permanente si operan sobre un largo periodo de tiempo (Billings, 1965).

2.2.2. ELEMENTOS DE UNA FALLA

Las grietas o fracturas que contengan desplazamiento se denominan fallas geológicas, puede ocurrir en una roca en uno, dos o tres modos fundamentales, o en una combinación de estos, donde existen esfuerzos y periodos de relajación, lo cual da como resultado lo que denominamos estructuras geológicas (Allmendinger, 2015).

Las fallas son estructuras complejas o compuestas que pueden acomodar grandes cantidades de tensión, una falla es cualquier superficie o zona con visible desplazamiento a lo largo de esta zona (Fossen, 2010).

a. PRINCIPALES ELEMENTOS DE UNA FALLA

Una falla es el producto de la interacción de esfuerzos, la cual tiene elementos que permiten su estudio y comprensión (Camargo, 2015) (Fig. 3).

Falla: Fractura en la roca a lo largo de la cual ha ocurrido desplazamiento.

Plano de Falla: plano o superficie a lo largo del cual ha ocurrido desplazamiento.

Bloque Techo: Bloque que descansa por encima de un plano de falla inclinado; si el plano de falla es vertical este término no es aplicable.

Bloque piso: bloque que yace por debajo de un plano de falla inclinado.

Falla con desplazamiento: falla cuyo desplazamiento tiene componentes en la dirección del buzamiento y en la dirección del rumbo del plano de falla.

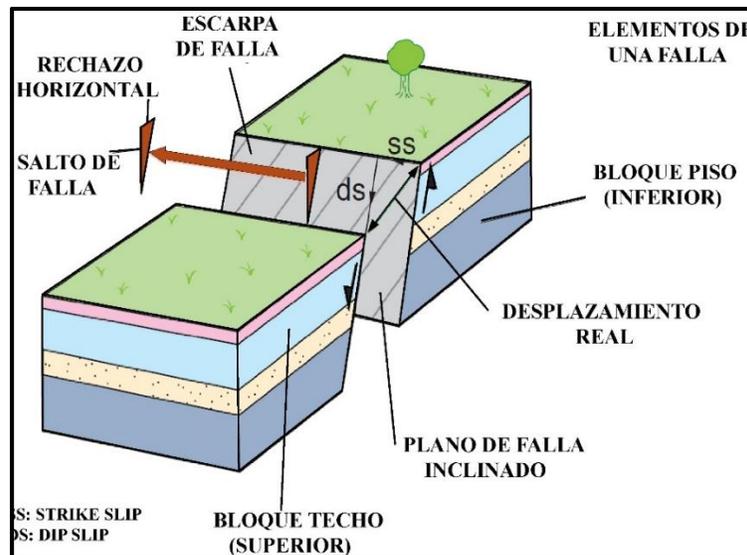


Figura 3: Elementos estructurales de una falla geológica (modificado de Coe, 2010).

Desplazamiento neto: desplazamiento en la dirección misma del movimiento; se expresa como la distancia medida sobre el plano de falla, entre dos puntos localizados en bloques opuestos, que antes eran adyacentes.

Desplazamiento de buzamiento: componente del desplazamiento neto en la dirección del buzamiento de una falla; a su vez, este desplazamiento puede ser descompuesto en dos componentes: desplazamiento vertical o salto y desplazamiento horizontal o rechazo.

Salto de Falla: desplazamiento vertical de una falla; equivale a la componente vertical de desplazamiento de buzamiento.

Rechazo: desplazamiento horizontal de una falla; equivale a la componente horizontal del desplazamiento de buzamiento.

Desplazamiento de rumbo: componente del desplazamiento neto en la dirección del rumbo de la falla.

b. TIPOS DE FALLAS

Existen diferentes clasificaciones para fallas, de acuerdo a su geometría, al desplazamiento relativo de bloques, etc. (Fig. 4); entre las más comunes tenemos las siguientes fallas.

- A) **NORMAL:** Falla en la cual el bloque techo ha descendido con relación al bloque piso; también se denomina falla gravitacional.
- B) **INVERSA:** Falla en la cual el bloque techo ha ascendido con relación al bloque piso.
- C) **DE RUMBO:** Falla cuya traza es paralela al rumbo de las capas, esta falla no debe confundirse con la falla de desplazamiento de rumbo.
- D) **LÍSTRICA NORMAL:** Falla cuya superficie es curva, con buzamiento alto hacia la superficie y bajo hacia la profundidad; el bloque techo ha descendido con relación al bloque piso.
- E) **CABALGAMIENTO:** Falla inversa cuyo plano de falla presenta bajo ángulo de buzamiento.
- F) **ROTACIONAL:** Falla en la cual uno de los bloques ha rotado con respecto al otro. En uno de los extremos tiene comportamiento normal y en el otro inverso.

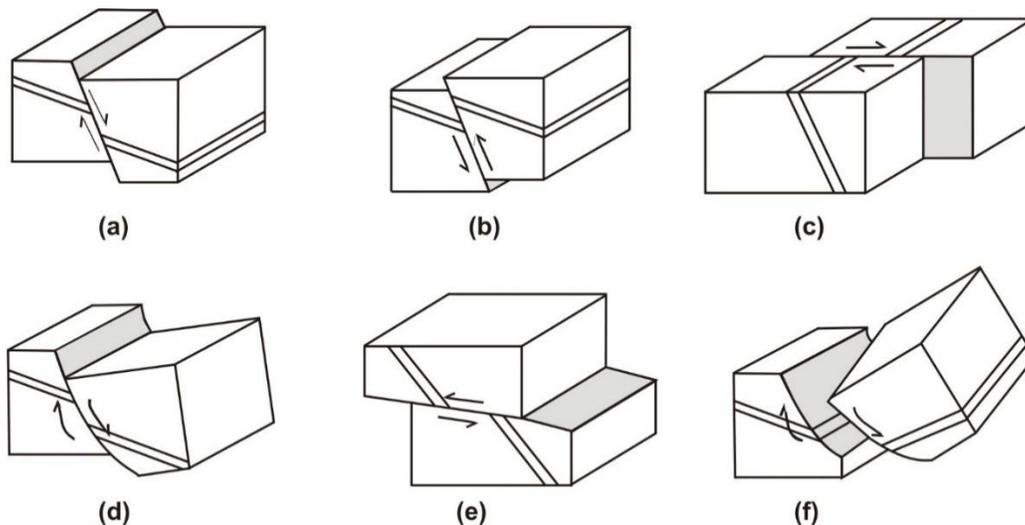


Figura 4: Tipos de fallas ideales (Camargo, 2015).

2.2.3. TRANSPRESIÓN Y TRANSTENSIÓN

Hemos visto que las curvaturas en fallas de rumbo pueden producir componentes locales de compresión o extensión. El tipo de deformación que se produce en tales curvaturas se conoce como “Transpresión” y “Transtensión”. Estos modelos de deformación no tienen que limitarse a fallas curvas, sino, pueden dominar toda la longitud de la falla de rumbo si la zona de falla o de cizalla no es puramente de rumbo. Para una zona de cizalla, esto significa una derivación de cizalla simple, donde contiene un componente adicional de acortamiento o la extensión perpendicular al plano de falla.

En general, el concepto “Transpresión” se refiere al espectro de combinaciones propias de un sistema strike-slip y la tensión que implica el acortamiento perpendicular a la zona (Fig. 5) y la transtensión abarca las combinaciones de cizalla y extensión perpendicular. Es decir; transpresión (transtensión) es la combinación simultánea de componentes strike-slip (falla de rumbo) o movimientos de cizalla simple a lo largo de una estructura y el acortamiento (extensión) es perpendicular a la misma.

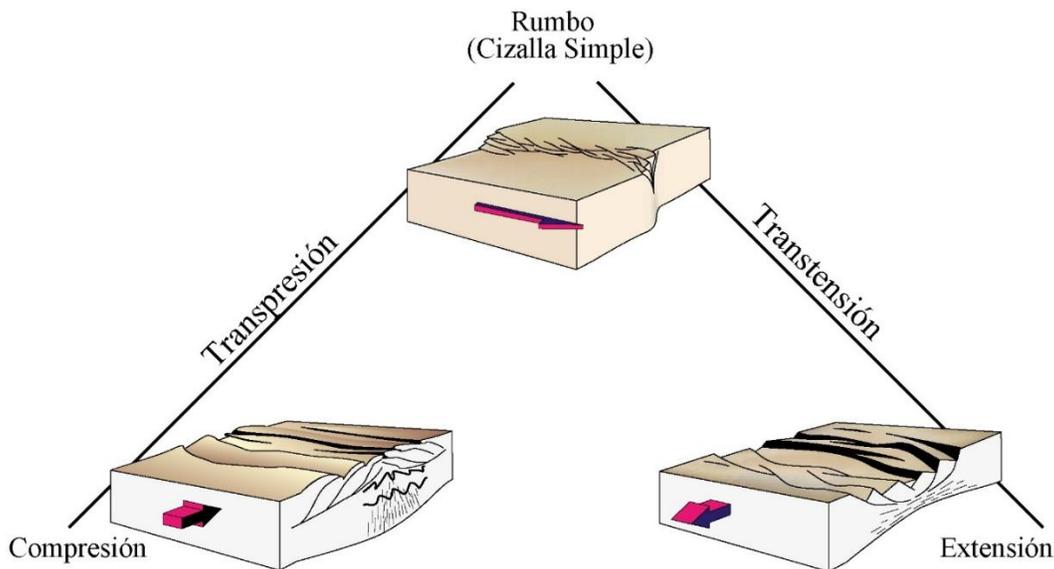


Figura 5: Modelos de transpresión y transtensión conectados por estilos de compresión, strike slip (rumbo) y extensión (Fossen, 2010).

2.2.4. MODELO DE ANDERSON PARA FALLAS

Anderson, (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley Mohr-Coulomb requieren que cerca de la superficie de la tierra

solo se pueden formar fallas de deslizamiento según la dirección (desgarre), y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales o inversas) (Babín Vich & Gómez., 2010).

A partir de las orientaciones de las fallas que se han formado en un campo de esfuerzos dado, se puede evaluar estereográficamente la orientación de los esfuerzos principales que han dado lugar a estas fallas, o bien, conocida la orientación de los esfuerzos y el valor del ángulo de fricción interna de la roca, deducir la orientación y características de fallas resultantes.

Dado la propuesta de Anderson (1951), se tendrá en cuenta las principales premisas:

- Los tres ejes principales de esfuerzos son perpendiculares entre sí.
- La línea de intersección de los círculos mayores en las fallas conjugadas es σ_2 .
- El plano perpendicular a σ_2 se denomina plano de movimiento, y contiene a σ_1 y σ_3 .

La línea de intersección de los dos planos de falla en todos los casos coincide con el esfuerzo principal medio σ_2 .

Anderson propone un modelo de clasificación dinámica para las fallas, basado en el posicionamiento de los tres vectores principales σ_1 , σ_2 , σ_3 , ortogonales entre sí (Fig. 6).

Anderson restringe este modelo al siguiente requisito general de:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

MODELO ANDERSONIANO PARA FALLAS

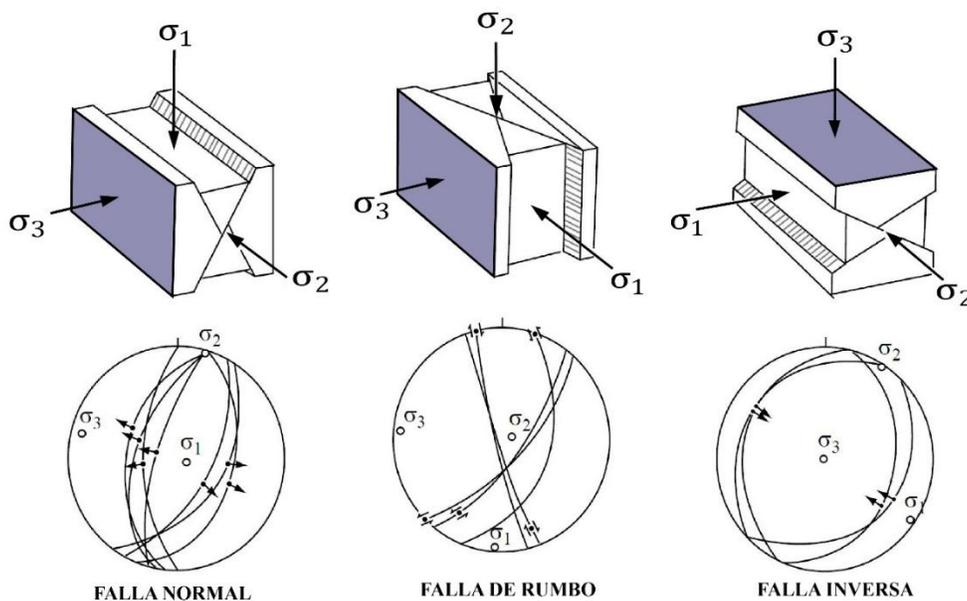


Figura 6: Modelo de Anderson para clasificar fallas (modificado de Rowland, 2007).

REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LA CLASIFICACIÓN DE ANDERSON

La relación existente entre el método poblacional de fallas (criterio en el cual se fundamenta el software FaultKin) y la clasificación andersoniana de fallas. Se basa en limitar para cada falla las zonas de espacio compatibles en compresión y en extensión (Fig. 7) superponiendo estos campos en proyección estereográfica (Babín-Vich & Gómez, 2010.) La zona de Tacna presenta un sistema estructural muy complejo, cuya arquitectura de fallas están caracterizados por fallas inversas, normales y fallas de rumbo (susceptibles para clasificación andersoniana), además fallas compuestas, las cuales están relacionadas a sistemas de Riedel a escala regional, lo cual implicaría un mismo evento tectónico para fallas y estructuras asociadas (McClay & Bonora, 2001).

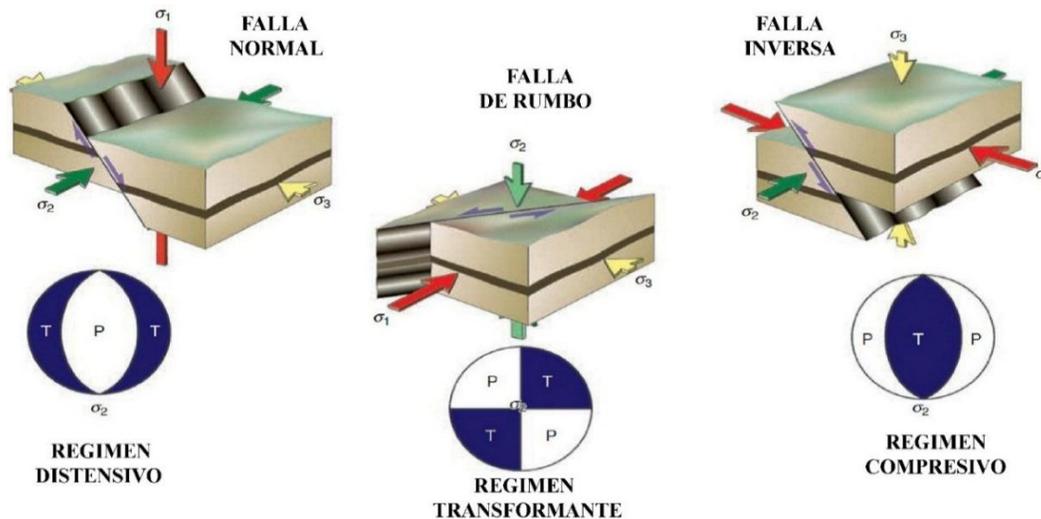


Figura 7: Block diagrama derivado del modelo Andersoniano y su relación con la representación estereográfica en FaultKin (modificado de Fossen, 2010).

2.2.5. ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO

2.2.5.1. COMPATIBILIDAD GEOMÉTRICA (SISTEMA O MODELO RIEDEL)

La existencia de estructuras por deformación tectónica es atribuida a la acción de esfuerzos que actuaron sobre un determinado afloramiento rocoso. Independientemente de que estas sean vistas a escala regional o local, el arreglo geométrico tiene características propias bajo un estado de esfuerzo dado. A partir de esa premisa, se desprenden dos situaciones ideales que generalizan dicho concepto. El primero, corresponde a un régimen compresivo

relacionado a la generación de fallas inversas y pliegues (Fig. 8); y el segundo a uno extensional asociado a fallas normales. En cada uno de estos procesos, el conjunto de estructuras formadas son compatibles o sincrónicas con la deformación, las que a su vez tienen orientaciones definidas respecto al campo de esfuerzos dominante.

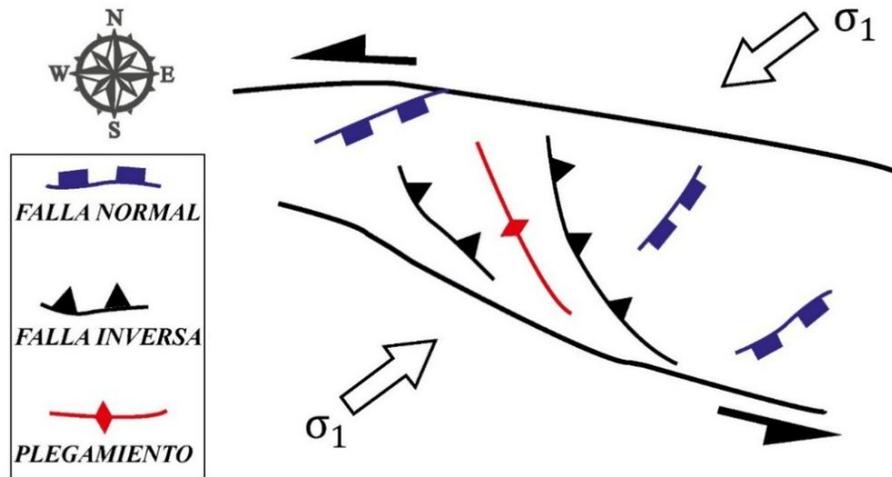


Figura 8: Estructuras compatibles (Fallas inversas, normales y pliegues) para una compresión regional NE-SO de un sistema de rumbo sinistral (adaptado de McClay & Bonora, 2001).

Además, un hecho a tener en cuenta es la edad de la deformación, la que en base a edades relativas (relaciones estratigráficas) o absolutas (dataciones radiométricas) ayuda a distinguir que fallas se han producido simultáneamente con otras. Sin embargo, en la naturaleza es común que las rocas antiguas muestren superficies de falla con deformación sobrepuesta por reactivación; por ende, estas últimas tengan orientaciones aparentemente compatibles con otras más jóvenes, pero con una cinemática distinta (Fig. 9).

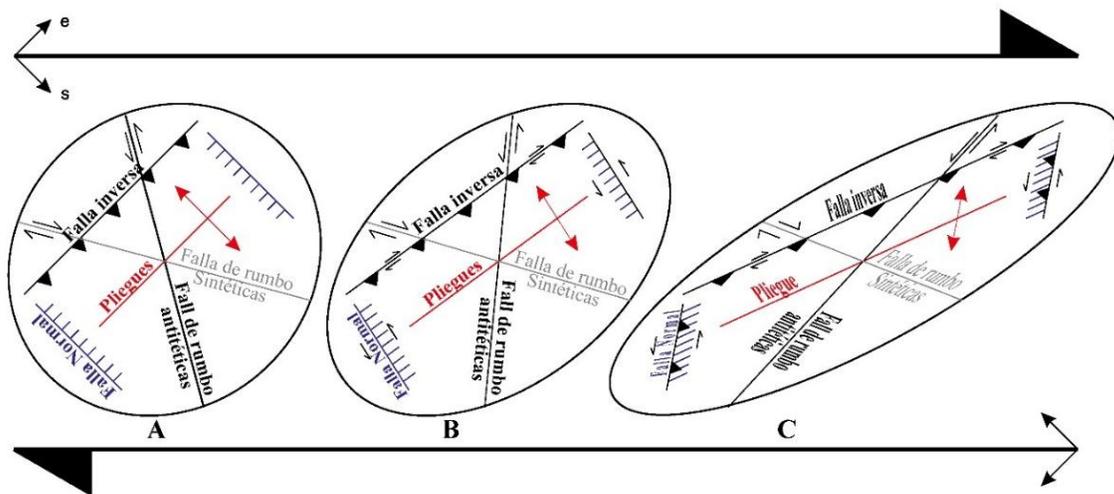


Figura 9: Deformación de cizalla simple de un sistema de rumbo dextral (Waldron, 2005).

Nótese que en la Figura 10, la deformación se incrementa de izquierda a derecha, siendo las fallas más antiguas las que son reactivadas sucesivamente (en gris). De acuerdo a su disposición geométrica resultante, estas fallas tienen una aparente compatibilidad con las más jóvenes debido a que permiten su sucesiva reactivación (después de Waldron, 2005). Al tener una segunda compresión N-S a lo largo de un sistema de rumbo dextral, se forman de manera análoga al primer ejemplo, fallas normales e inversas compatibles que son diferentes en tiempo con fallas inversas y pliegues NO-SE (Fig. 10).

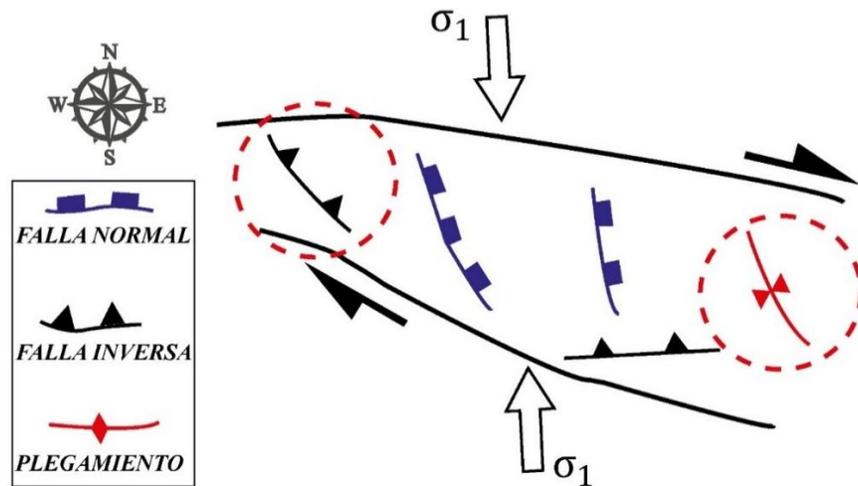


Figura 10: Fallas normales e inversas compatibles para una compresión regional N-S en un sistema de rumbo dextral. Asimismo, se observa estructuras que no son compatibles (en círculos rojos punteados) con esta deformación (adaptado de McClay & Bonora, 2001).

En general, el criterio de Riedel (Fig. 11), permite comprender el mecanismo de estructuras que juegan en un mismo sistema estructural; en el cual se generan una serie de fallas normales e inversas y plegamientos.

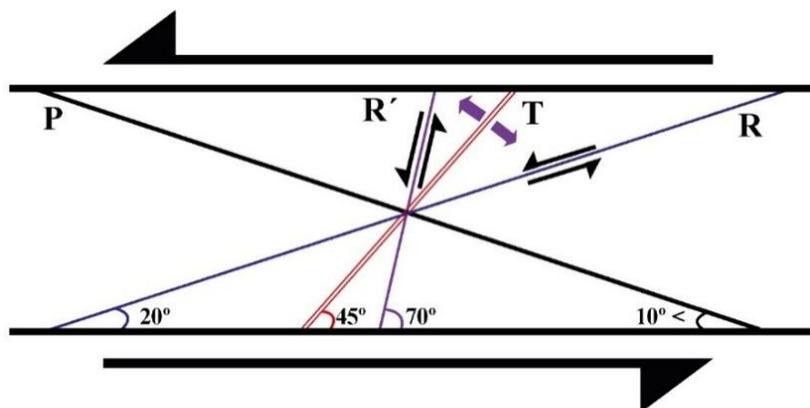


Figura 11: Modelo de estructuras tipo "Riedel" aplicado para la definición de la generación de estructuras asociadas a un mismo sistema estructural (modificado de Petit, 1987).

Donde:

R: Sintética al movimiento de la falla principal

T: Grietas de Tensión

R': Antitética al movimiento de la falla principal

P: Antitética al movimiento de la falla principal, mayor cizalle.

2.2.5.2. MÉTODO DE LOS DIEDROS RECTOS

Las fallas constituyen un elemento fundamental en cualquier tipo de análisis tectónico, si bien el amplio rango de escalas en el que aparecen hace su estudio pueda abordarse desde distintos enfoques.

Uno de estos puntos de vista es el del análisis poblacional de fallas, que consiste en estudiar este tipo de estructuras desde un punto de vista estadístico.

Dentro de este tipo de análisis uno de los métodos que ha tenido una mayor aceptación ha sido de los diedros rectos (Angelier & Mechler., 1977), representa los distintos tipos de esfuerzo-deformación que se relacionan con los distintos tipos de fallas (Fig. 12).

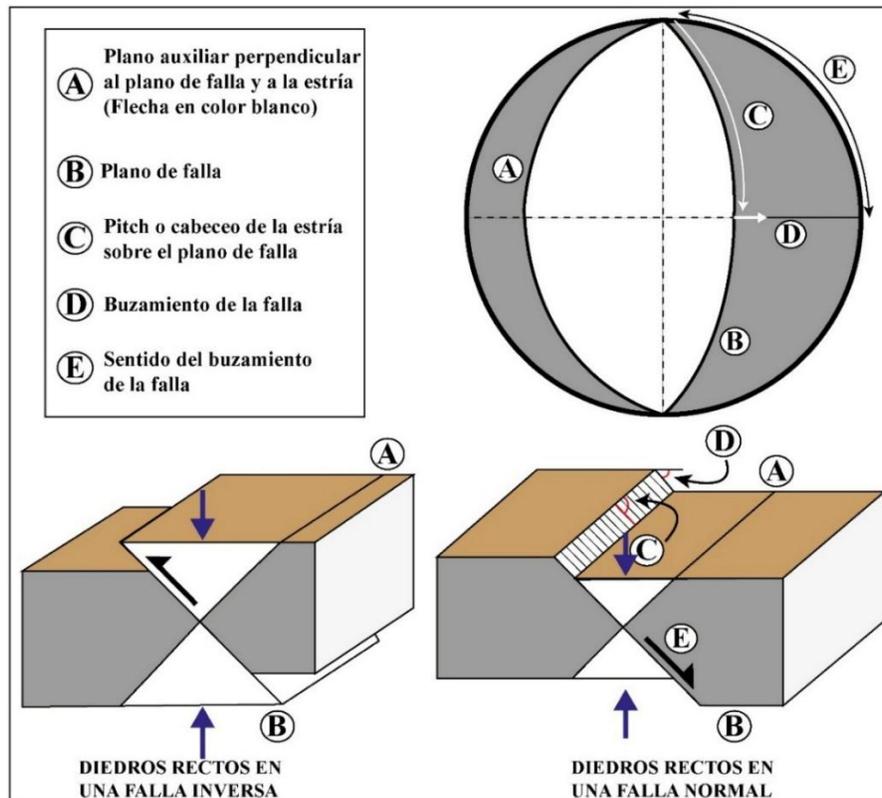


Figura 12: Esquema de diedros rectos en una falla en proyección estereográfica y block diagrama de fallas normales e inversas (Modificado de De Vicente et al., 1992).

Cuando una falla se mueve, el propio plano de falla y el plano perpendicular a la orientación del movimiento relativo entre los dos labios de falla, representada por la estría de fricción, dividen el espacio en cuatro cuadrantes (Angelier & Mechler., 1977; De Vicente et al., 1992). Según sea el movimiento, estos “diedros rectos” quedarán en modo alterno en compresión y en tensión. La representación de estos elementos en proyección estereográfica es similar a la de los mecanismos focales de terremotos.

Si se considera que cada movimiento correcto de una falla responde a la acomodación del campo de esfuerzo - deformación sobre dicha estructura, resultará posible determinar las características de este campo regional desde el análisis de los movimientos (mecanismos focales) de las fallas relacionadas. Este “problema inverso” constituye lo que se ha venido a denominar como “análisis poblacional de fallas” (Angelier, 1994).

2.2.5.3. MÉTODO DE LOS FRACTALES

Benoit Mandelbrot es considerado el pionero de los trabajos sobre fractales, siendo el término “Fractal” definido por este autor en 1975. Mandelbrot, (1975) demostró que algunas estructuras naturales de bastante complejidad presentan cierta irregularidad geométrica tales como la invarianza al cambio de escala.

La geometría fractal representa un nuevo lenguaje, una nueva visión de cosas tan comunes presentes en la naturaleza como una nube, un helecho, fracturas, redes de drenaje, etc. Barnsley & Devaney (1988).

En Geología, estos conceptos se empezaron a utilizar, principalmente en los campos de geomorfología y sismología, cuando en la zona de la falla de San Andrés en California se descubrió que los sismos de magnitud 6 o menor tenían una distribución fractal en el espacio y en el tiempo.

Los fractales se basan en el concepto de “auto- semejanza”, una propiedad que representan a aquellos sistemas cuyas estructuras permanecen constantes al variar la escala de observación, en otras palabras, cuando “las partes”, por pequeñas que éstas sean, se parecen al “todo” (Gumiel, 1996).

Se han visto casos en plegamientos, donde éstas estructuras corresponden geoméricamente a pliegues de orden inferior (Fig. 13), esta teoría podría revolucionar el entendimiento e

interpretación de la geología estructural, es decir, aplicarlos a modelos estructurales de escala regional con estudios a nivel microscópico.

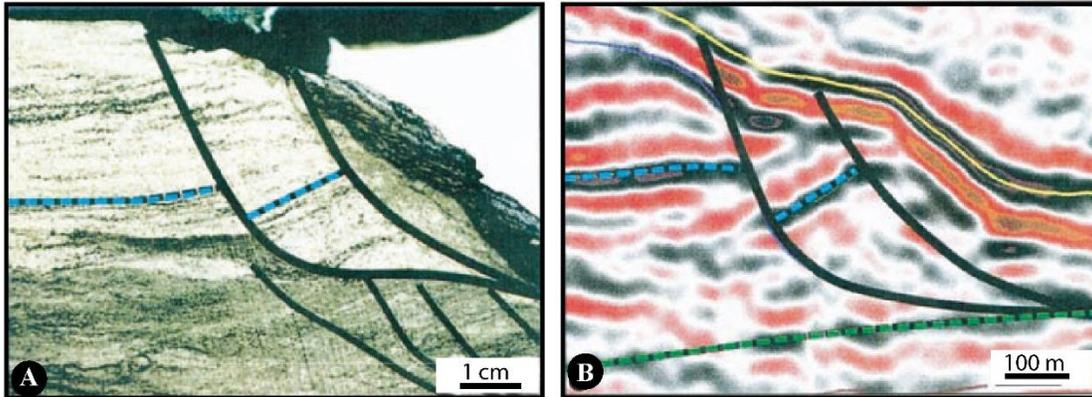


Figura 13: Estructuras tectónicas en (A) a escala centimétrica y en (B) a escala métrica, ambas en los campos de Statfjord, mar del norte. Las dos estructuras cumplen el concepto de auto-semejanza relacionada a la geometría fractal (Fossen, 2010).

2.2.6. PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

La proyección estereográfica es un tipo de proyección muy usado en geología estructural para establecer la relación angular existente entre las estructuras geológicas (Fig. 14). Todas las proyecciones permiten la representación de objetos tridimensionales en una superficie de dos dimensiones. La proyección estereográfica es conforme, es decir, conserva la verdadera magnitud de los ángulos en la proyección, de ahí que también se denomine proyección equiangular (Tomás et al., 2002).

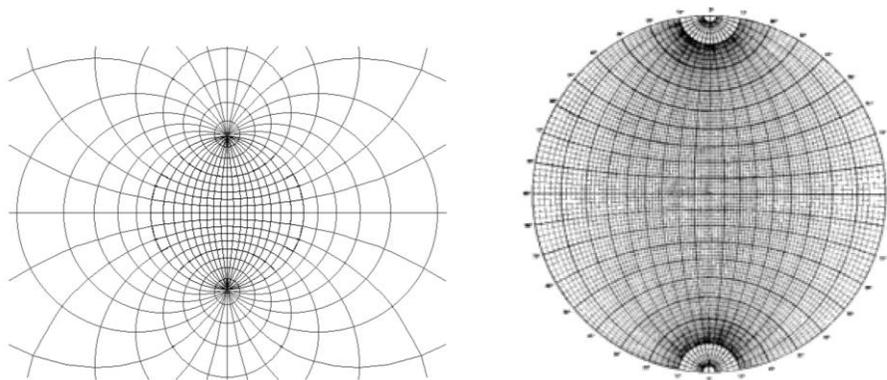


Figura 14: Proyección estereográfica de la esfera y falsilla de Wulff (Tomás et al., 2002).

2.2.7. SÍSMICA DE REFLEXIÓN

La herramienta principal para el estudio del subsuelo es la sísmica de reflexión. Cuando una onda atraviesa una interfaz entre dos medios con distinto índice de refracción, parte de ella se refleja y parte de ella se refracta. Este principio es utilizado en la sísmica de reflexión. Se emiten ondas de choque en el subsuelo y se colocan una serie de geófonos (sensores) distribuidos en la superficie que reciben las reflexiones producidas.

Cronometrando el tiempo entre la emisión y la recepción de la onda en cada geófono es posible estimar la distancia al punto donde se produjo el rebote. Cambiando la posición del emisor se obtienen múltiples imágenes de un mismo punto a través de rayos que realizaron distintos trayectos. Esto permite separar las anomalías locales que pudieran existir y los ruidos generados por otros factores para medir con exactitud la distancia y la posición de cada punto.

Es común en una línea sísmica representar la profundidad en segundos (TWT), el tiempo que tardó la onda en hacer el recorrido desde el emisor hasta el receptor.

Cuando los estratos están dispuestos en forma casi horizontal este método funciona perfectamente (Fig. 15); se pueden eliminar los ruidos y obtener una imagen fiel del subsuelo. Pero a medida que la inclinación de los estratos aumenta los rebotes pueden exceder la ubicación de los geófonos y estos nunca recibir la señal (Zlotnik et al., 2002).

En cambio cuando en el subsuelo tenemos estratos verticales a subverticales es muy probable que los rebotes de las ondas puedan salir del alcance de los geófonos, lo cual dificultaría la interpretación sísmica.

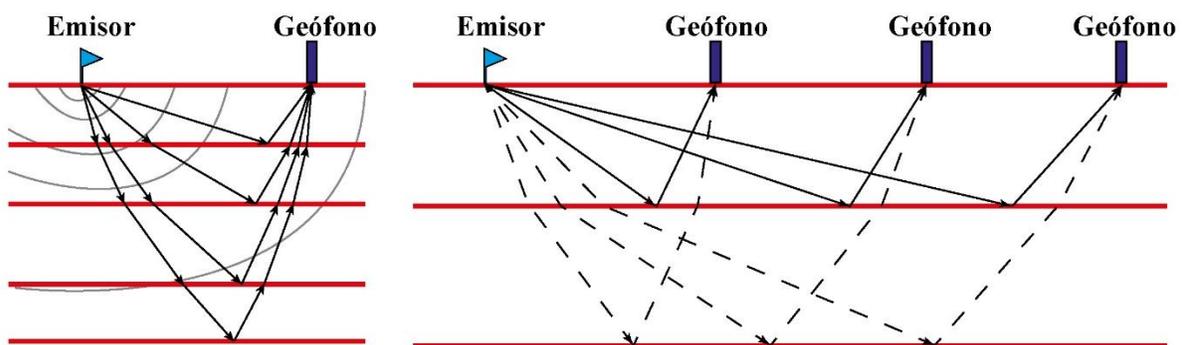


Figura 15: Bases de la sísmica de reflexión, esquema representativo de Zlotnik et al. (2002).

REFLECTORES SÍSMICOS Y SUS TERMINACIONES

La identificación de estas terminaciones así como los patrones sísmicos sirven como una herramienta importante para el análisis de las líneas sísmicas.

Categorización de las terminaciones

Las terminaciones están caracterizadas en las secciones sísmicas bidimensionales, por las relaciones de geometría entre las superficies sísmicas contra las cuales estas terminan. Mitchum et al. (1977) ha introducido términos como “*lapout, truncation, baselap, toplap, onlap y downlap*” los estilos de terminación de las superficies reflectadas (Fig. 16).

- **LAPOUT:** es la terminación lateral de un estrato contra una superficie sísmica y su límite depositacional implica que el reflector originalmente se extendió más allá pero ha sido erosionado (truncación erosional) o truncado por un plano de falla, una superficie de deslizamiento, un contacto con sal o lutita móvil o una intrusión ígnea.
- **BASELAP:** es el lapout o reflexión contra una superficie sísmica (la cual marca la base del paquete sísmico). El baselap puede consistir de *downlap*, donde el buzamiento de la superficie es menor que el buzamiento del estrato superpuesto, o *onlap* donde el buzamiento de la superficie es mayor. El *downlap* comúnmente es visto a la base de clinoformas progradantes sobre zonas más distales de la cuenca. Es extremadamente difícil generar downlap en un ambiente subaéreo. El onlap está reconocido como en la data sísmica por la terminación de bajo ángulo contra una superficie sísmica empinada.
- **TOPLAP:** es la terminación de reflexiones inclinadas contra una superficie de bajo ángulo superpuesto, la cual se cree que representa un límite depositacional proximal, es la evidencia de un hiatus no depositacional, bypass de sedimentos y erosión.
- **TRUNCACIÓN EROSIONAL:** es la terminación de estratos contra superficies erosionales superpuestas, la truncación implica desarrollo de relieve erosional o desarrollo de una discordancia angular.
- **TRUNCACIÓN POR FALLA:** representan la terminación de los reflectores contra una falla post o sin depositacional, deslizamiento o un plano de intrusión.

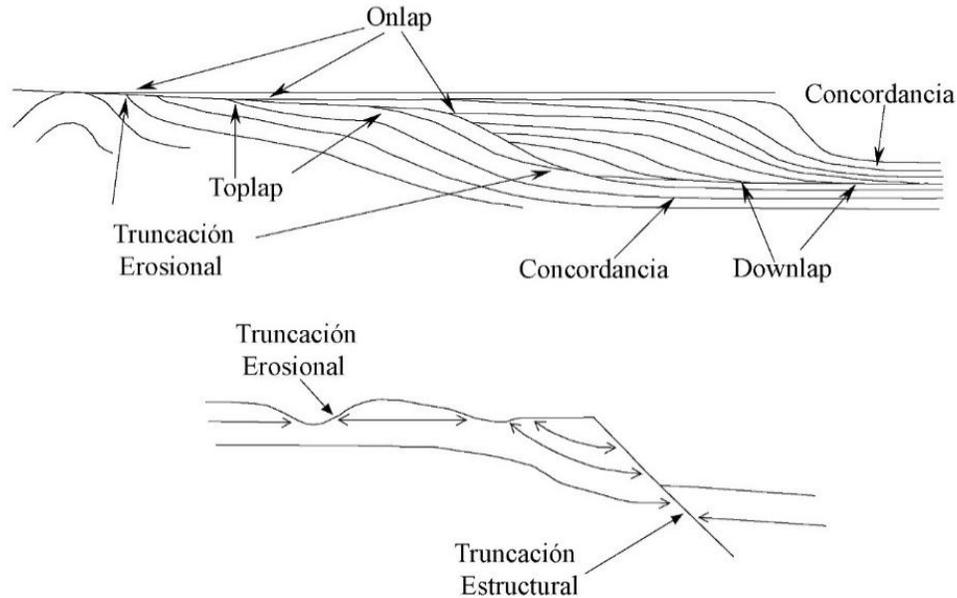


Figura 16: Las terminaciones estratales en el análisis de líneas sísmicas (modificado de van Wagoner et al., 1988).

PATRONES DE REFLECTORES SÍSMICOS

Comúnmente indican los procesos y el ordenamiento depositacional (Fig. 17) y pueden ser:

- **Las configuraciones paralelas y subparalelas:** que están usualmente dispuestos como hojas una sobre otra, sugiriendo ratios uniformes de deposición, una subsidencia de la plataforma uniforme o una estabilidad en el piso de la cuenca.
- **Las configuraciones divergentes:** se caracterizan por ser una unidad con los estratos en forma acuñada, que convergen en una sola dirección hacia el continente y se abren y engrosan hacia la cuenca, tienen su origen depositacional en las variaciones de la tasa de sedimentación o en la inclinación de la superficie de deposición a lo largo del tiempo.
- **Las configuraciones progradacionales:** resultan a partir de la progradación de las unidades depositacionales como superficies suavemente inclinadas, que se llaman clinofomas. Algunas veces las unidades pueden ser divididas *en topsets* (undaforms), *foresets* (clinofomas) y *bottomsets* (fondoforms). Las configuraciones progradacionales pueden ser: sigmoidal, oblicua, tangencial, paralela, sigmoidal oblicua compleja, intercalada y en mamelón (*hummocky*).

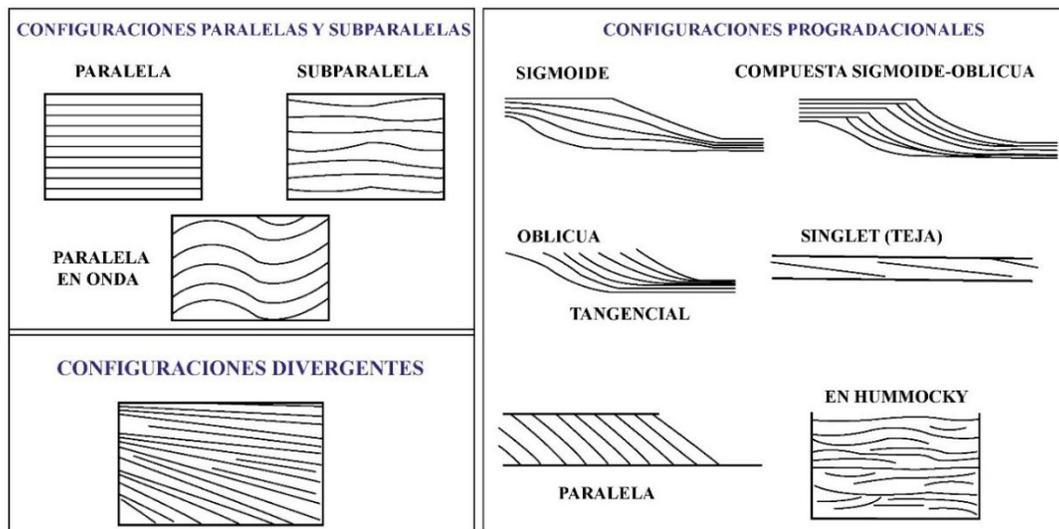


Figura 17: Patrones de sedimentación obtenido de reflectores sísmicos (modificado de Mitchum et al., 1977).

2.3.DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Deformación: Modificación que sufre una roca o material por acción de uno o más esfuerzos. Las deformaciones de los materiales está regida o controlando por la Ley de Young. Existen dos tipos de deformación: (i) elástica y (ii) plástica (Fossen, 2010).

Estría (Slickenside): Surcos no muy profundos que aparecen en los minerales y en las rocas, siguiendo una determinada dirección (Dávila, 2011).

Falla Transcurrente: Son fallas verticales que poseen un movimiento de bloques en sentido horizontal, típicas en límites transformantes de placas tectónicas; estas fallas siguen una relación de desplazamiento de longitud, es decir, de máximo desplazamiento. Pueden ser dextrales o sinestrales de acuerdo al movimiento relativo de los bloques (Fossen, 2010).

Inversión Tectónica: Se refiere a la reactivación de fallas extensionales preexistentes a fallas compresivas (Cooper et al., 1989).

Microtectónica: Ciencia que estudia la tectónica de los plegamientos y estructuras geológicas en general, a la escala de muestra de mano o en sección pulida o lámina delgada. (Dávila, 2011).

Tectónica: Ciencia, rama de la geología que estudia los movimientos diferentes de la corteza terrestre por acción de los esfuerzos endógenos (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) están ubicados en la ladera oeste de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, entre los paralelos 69°30' a 70°30' de longitud oeste y 17°30' a 18°00' de latitud sur (Tabla 1). Estos cuadrángulos presentan un área aproximadamente de 5000 km^2 .

- DEPARTAMENTO: Tacna
- PROVINCIA: Tacna
- DISTRITOS: Pachía y Palca

El área de estudio es un polígono cuadrangular cuyos vértices representan la unión de dos cuadrantes de Pachía (36v1 - 36v2) y dos cuadrantes de Palca (36x3 - 36x4), y presentan las siguientes coordenadas:

Tabla 1: Ubicación geográfica del área de estudios ubicada entre los cuadrángulos de Pachía y Palca (DATUM WGS 84).

COORDENADAS DEL ÁREA DE ESTUDIOS		
VÉRTICE	ESTE	NORTE
V1	376000	8060000
V2	408000	8060000
V3	408000	8024000
V4	376000	8024000

3.1.2. UBICACIÓN POLÍTICA

El área de estudios se ubica al norte y noreste de la ciudad de Tacna y comprende los distritos de Pachía y Palca en la provincia de Tacna (ver Anexo N°2), y los distritos de Estique Pampa y Estique en la provincia de Tarata, todos en el departamento de Tacna, sur del Perú (Fig. 18).

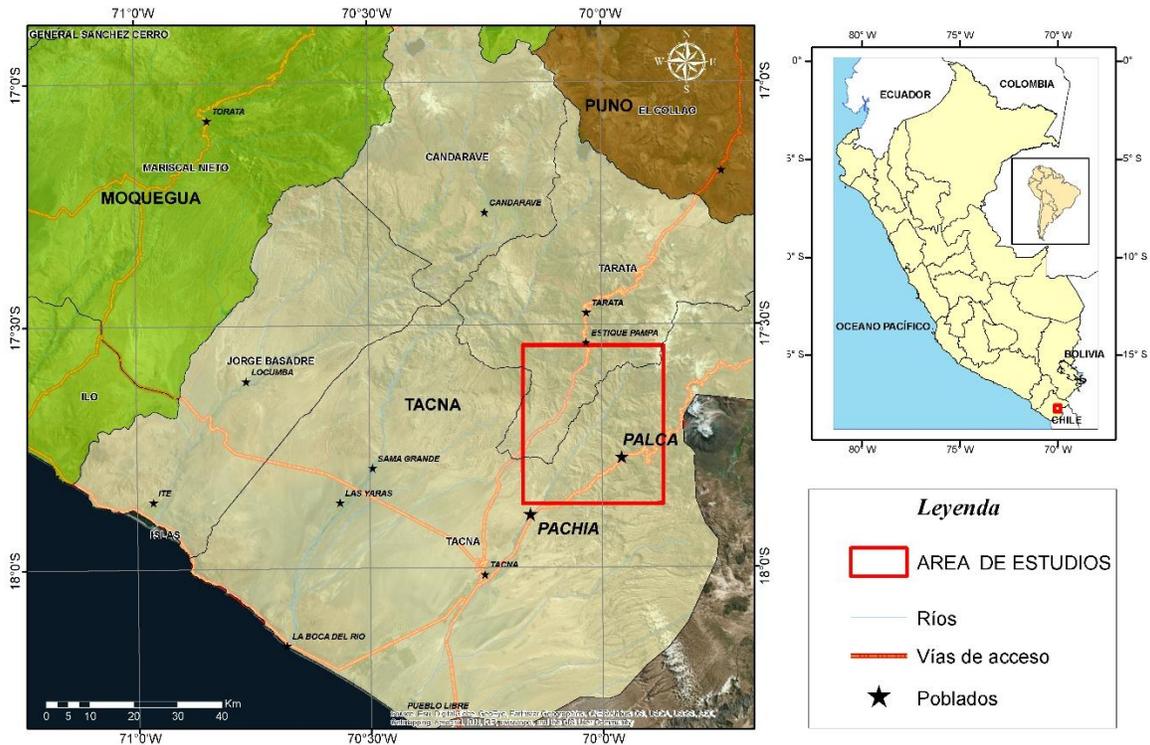


Figura 18: Mapa de ubicación de la zona de estudios.

3.1.3. ACCESOS A LA ZONA DE ESTUDIOS

El acceso al área de estudio se realiza por vía aérea y terrestre (Tabla 2). La distancia desde la ciudad de Lima hasta la ciudad de Tacna es 1231 km por la carretera Panamericana Sur (Fig. 19). Desde la ciudad de Tacna hasta el poblado de Pachía, se recorre ~20 km utilizando la carretera N° 40. A partir de este poblado, se accede a los puntos de interés mediante carreteras sin asfaltar, trochas carrozables y caminos de herradura. En ocasiones, algunas zonas no cuentan con accesos, por ello, se utilizan los cauces de los ríos y las extensas pampas. Los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) tienen buenos accesos (Fig. 20); estos cruzan gran parte del área cubriendo aproximadamente un 60%, el resto del territorio es accesible por medio de caminos de herradura y quebradas secas. En la

actualidad, se vienen realizando obras de apertura de carreteras que favorecen aún más la accesibilidad a puntos distantes como, por ejemplo, a las partes altas de Río Caplina hacia la parte noroeste del cuadrángulo de Pachía, a lo largo de la Quebrada del río Sama.

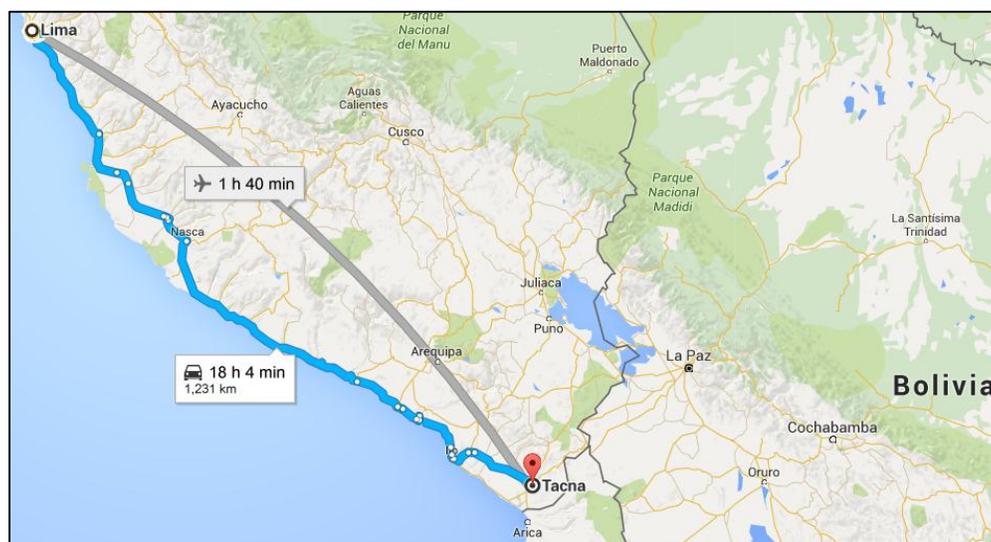


Figura 19: Accesos, aéreo y terrestre para llegar a la ciudad de Tacna desde Lima.

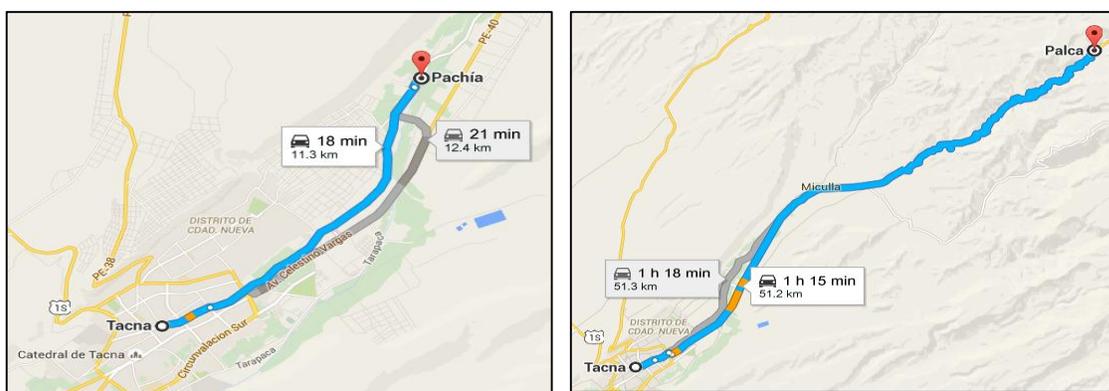


Figura 20: Accesos desde Tacna a los distritos de Pachía y Palca.

Tabla 2: Tiempo y distancia entre las ciudades involucradas en el presente estudio.

Tramo	Tipo de vía	Distancia	Tiempo
Lima – Tacna	Aérea	990 Km (Distancia recta)	100 minutos
Lima - Tacna	Terrestre	1231 Km (Por carretera)	18 horas
Tacna - Pachía	Terrestre	11,3 Km	18 minutos
Tacna - Palca	Terrestre	52,3 Km	78 minutos

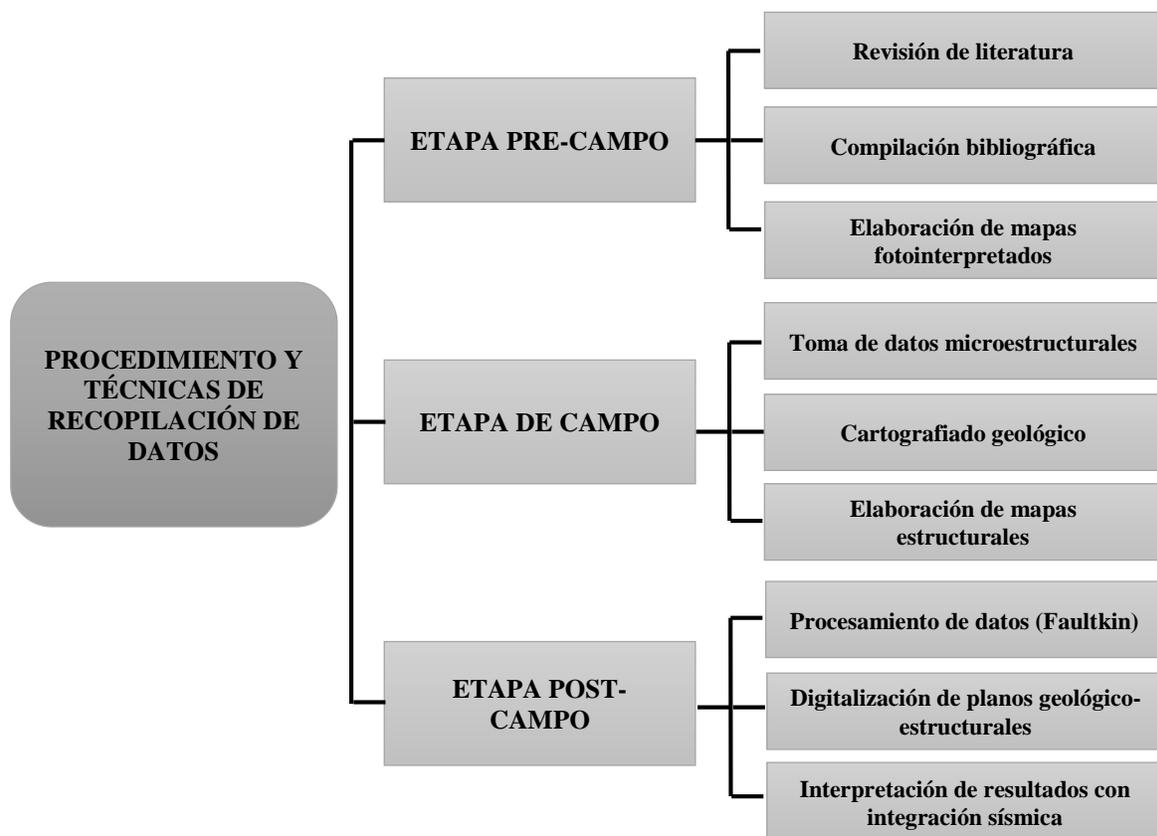
3.2. TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Por el tipo de investigación, esta es descriptiva y explicativa no experimental y transversal en el tiempo. Por otro lado, se toma como punto de partida la observación para establecer los métodos de investigación, los cuales serán utilizados entre ellos: Lógico – Deductivo, Hipotético – Deductivo, Lógico Inductivo, Analítico.

3.3. PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS DE RECOPIACIÓN DE DATOS

Los procedimientos y técnicas de recopilación de datos inician desde la revisión literaria y compilación de información bibliográfica referente al tema de investigación hasta la interpretación de resultados, esta metodología está comprendida en tres etapas fundamentales y secuenciales (Tabla 3).

Tabla 3: Procedimiento y técnicas de recolección de datos.



3.3.1. ETAPA PRE-CAMPO, REQUERIMIENTO BIBLIOGRÁFICO

En la Dirección de Geología regional (DGR) del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) se llevó a cabo una recopilación bibliográfica de libros (libros de consulta, de análisis y de interpretación), artículos científicos, boletines geológicos, tesis de grado y postgrado, páginas de internet validadas de divulgación geocientífica (journals) con información de los últimos años relacionado al tema de investigación. Asimismo se recopiló la cartografía geológica (incluyendo mapas topográficos, satelitales, secciones estructurales) existente del área de estudio.

3.3.2. ETAPA DE CAMPO

La presente tesis enfatizó el trabajo de campo en 2 campañas que se describe a continuación.

Se desarrolló en dos campañas de campo de 25 días cada una donde se tomaron en cuenta la toma de datos microestructurales (rumbo y buzamiento de plano de falla, indicadores cinemáticos, pitch) en Pachía – Palca y alrededores sintetizado en 38 estaciones microtectónicas (EM), complementando con el cartografiado geológico y toma de muestras.

3.3.3. ETAPA POST CAMPO

De acuerdo al INGEMMET, la cartografía estructural (identificación de las principales fallas, lineamientos y plegamientos) y cartografiado geológico constituyen los pilares fundamentales de la investigación geológica, es por ello que en esta etapa se procesaron los datos obtenidos en campo (pasando por una sub-etapa de validación de datos mediante estereografía) y la integración con algunos datos pre-existentes tomados por el Proyecto GR41A del INGEMMET en el año 2016. En esta etapa también se contempla la redacción de la tesis, así como la digitalización de los planos geológicos, estructurales, microtectónicos, geomorfológico y demás planos temáticos, y así realizar secciones interpretativas y columnas estratigráficas.

3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Los múltiples equipos que se utilizan tanto en campo como gabinete son de gran importancia para llevar a cabo la investigación; donde el mayor porcentaje de estos se emplean en campo, tales como la brújula, GPS, picota, larga vistas, rayador, ácido clorhídrico, planos geológicos, topográficos y satelitales, por lo cual conforman el equipo básico para realizar un estudio geológico.

Una vez realizado la etapa de campo, se procesa y valida los datos en gabinete, para lo cual también se emplean equipos e instrumentos tales como el microscopio petrográfico Leica, que permitirá analizar las microestructuras presentes en las muestras extraídas del campo, y los software que ayudaran a generar modelos respecto a la interpretación de los resultados analizados y procesados. Las técnicas empleadas para el acopio de la información serán:

- Observación Dirigida.
- Análisis Documental.
- Tomas de muestras in situ.
- Tomas Fotográficas.
- Secciones Delgadas.
- Análisis microscópico.
- Información sísmica del subsuelo.

INSTRUMENTOS

- Plano topográfico, coordenadas UTM WGS 84
- Plano geológico, coordenadas UTM WGS 84
- Plano estructural, coordenadas UTM WGS 84
- GPS Navegador Garmin Mal 60 Cx
- Brújula metálica BRUNTON
- Protactor Multiescala
- Picota ESTWING de mango largo o martillo de geólogo
- Lupa 20X Baush & Lamp.
- Largavistas marca Olympus.
- Lápiz de dureza Carbide (Rayador)

- Ácido clorhídrico al 10%.
- Wincha 5 m.
- Libreta de campo
- Bolsas de muestreo
- Cámara fotográfica digital Panasonic Lumix de 5 Megapíxeles.
- Software para procesamiento de datos (Faultkin)
- Microscopio petrográfico Leica de 40 aumentos.

3.5. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

El análisis e interpretación de datos será realizado en gabinete donde utilizaremos la data y muestras obtenidas en campo. Las cuales posteriormente nos permitan realizar conclusiones sólidas y confiables.

Es importante remarcar por esto el uso de un microscopio, como instrumento fundamental para llevar a cabo con mayor exactitud el análisis microtectónico así como métodos y técnicas de interpretación como el “Modelo de Riedel”, complementando con un análisis preciso y efectivo obtenido de las secciones delgadas practicadas a las muestras.

Además se empleará software de soporte para el análisis, como: Word, Excel, ArcGis, Stereonet, y Faultkin. Cabe resaltar la importancia del uso del programa Adobe Illustrator, el cual nos permitirá diseñar modelos esquemáticos y secciones geológicas ilustrativas de la zona de investigación.

3.6. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

La calidad de los datos es un factor muy importante a considerar, puesto que la interpretación de los resultados estructurales estará en función a los datos y medidas que tomamos en campo. La obtención de datos geológicos y estructurales tiene una serie de limitaciones que es preciso conocer, tales como la aplicación del control de calidad. Este concepto comienza desde la etapa pre-campo debido a que es necesario contar con equipos debidamente calibrados y configurados, para asegurar por lo cual es necesario y fundamental dar confiabilidad de dichos datos mediante la calibración de equipos como:

- GPS Navegador
- Brújula metálica Brunton.
- Microscopio Leica y Olympus.

De acuerdo al estudio realizado por Muños & De Vicente., (1988), mencionan que hay que tener en cuenta los errores de tipo numérico.

1. Los errores instrumentales de la brújula (en general) y el clinómetro, que pueden estimarse en $\pm 1^\circ$ para cada uno de los tres ángulos medidos.
2. Errores debido a las irregularidades de la superficie de falla y de la estría, que son cuantitativamente más importantes y que fácilmente alcanzan valores de $\pm 5^\circ$.
3. El error en el cálculo del tensor de esfuerzos. El grado de confianza de los resultados se mide en función de la variación del ángulo entre estrías teóricas y estrías calculadas y el número de fallas explicadas por el tensor.

3.7. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.7.1. GEOLOGÍA REGIONAL

Los trabajos regionales hechos en la zona de estudio son variados, teniendo como autores a Wilson & García en 1962, quienes en los trabajos de la Carta Geológica Nacional realizan la geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca, un año más tarde, Jaén & Ortíz (1963) realizaron los estudios de los Cuadrángulos de Tacna y La Yarada. Posteriormente, Salinas, (1983) realiza una tesis de bachillerato en Paleogeografía y Sedimentología en el sector de Palquilla, noreste de Tacna; luego el mismo autor refina su trabajo y lo complementa en el año de 1987, donde realiza un compilado de la Estratigrafía, Tectónica y Magmatismo en Tacna. Una década más tarde, en los años 2000 y 2003 INGEMMET realiza estudios de cartografiado geológico a escala 1: 100,000 en los cuadrángulos de Tacna y la Yarada, y a escala 1: 50, 000 en los Cuadrángulos de Pachía y Palca. Coetáneamente, Pino en el 2003, efectúa estudios más puntuales, enfocando su investigación al área de Mal Paso – Palca.

En orden decreciente de edad, estas rocas han sido agrupadas en las siguientes unidades: Complejo Basal de la Costa, Grupo Cabanillas, Grupo Ambo, Formación Chocolate, Formación Pelado, Formación Socosani, Grupo Yura con sus formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal, Hualhuani, Formación Matalaque, Grupo Toquepala, Grupo Tacaza con sus formaciones Tarata miembro superior e inferior y Formación Huilacollo, Formación Moquegua, Formación Huaylillas, Grupo Barroso y depósitos aluviales, fluviales, etc.

Las rocas intrusivas que afloran regionalmente corresponden: al Batolito de Challaviento, las unidades intrusivas del Batolito de la Costa, Unidad Yarabamba y a rocas Subvolcánicas (Monge & Cervantes., 2000).

COMPLEJO BASAL DE LA COSTA (PP-cbc-gn)

Aproximadamente a 50 Km al NNE de Tacna, en la localidad de Mal Paso, se halla en caserío de Huacano Chico, al que se accede por la carretera que va al poblado de Tarata. En este sector aflora una franja angosta de rocas metamórficas, aproximadamente de 10 km de largo y 2 km de ancho, consideradas como las más antiguas (Fig. 21).



Figura 21: Afloramiento de gneis con bandeamiento definido perteneciente al Complejo Basal de la Costa, en la Quebrada Huacano Grande (387243E, 8047449N).

Las rocas metamórficas afloran alrededor del Cerro Machani e infrayacen al Grupo Cabanillas (Monge & Cervantes., 2000) que se correlaciona con la formación Machani (Wilson & García., 1962). Estas rocas metamórficas consisten predominantemente en gneis y esquistos con un bandeamiento definido (Fig. 22). En el afloramiento se observa rocas de color gris oscuro – blanquecino (en intercalaciones), con estructura bandeada y minerales deformados y orientados de cuarzo. De acuerdo a estas características se trataría de un gneis perteneciente a esta unidad (387243E, 8047449N).

GRUPO CABANILLAS (D-c)

Definida por primera vez en la localidad de Cabanillas (Localidad Tipo) por Newell et al., (1945); estas rocas fueron descritas por Wilson & García., (1962) como Formación Machani, en los alrededores del Cerro Machani, Chinchillane y Anconsantine (Cuadrángulo de Pachía). Litológicamente está constituido hacia la base por conglomerados subredondeados a redondeados de clastos de gneis seguidos de una secuencia continua en la que se intercalan limolitas grises, con areniscas cuarzosas gris verdosas (Fig. 22-C).

GRUPO AMBO (Cm-a)

Estas rocas han sido estudiadas por Wilson & García., (1962) e inicialmente los asignaron al Triásico superior por el hallazgo de un bivalvo pre-Jurásico. Posteriormente Monge & Cervantes., (2000) nombran a esta unidad como Grupo Cabanillas en los alrededores del Cerro Machani, y mencionando plantas fósiles del Devónico. Pino et al., (2002) registra afloramientos bastante plegados, por lo que afirma es difícil determinar su espesor total; posteriormente Martínez et al., (2005) pone en tela de juicio la correlación entre las formaciones Machani (Grupo Cabanillas) y Ambo (W. Martínez, comunicación oral), encontrando fósiles típicos del Missisipiano correspondientes al grupo Ambo y que significarían un marcador temporal para esta formación, diferenciándola del Grupo Cabanillas (Fig. 22-A, B).

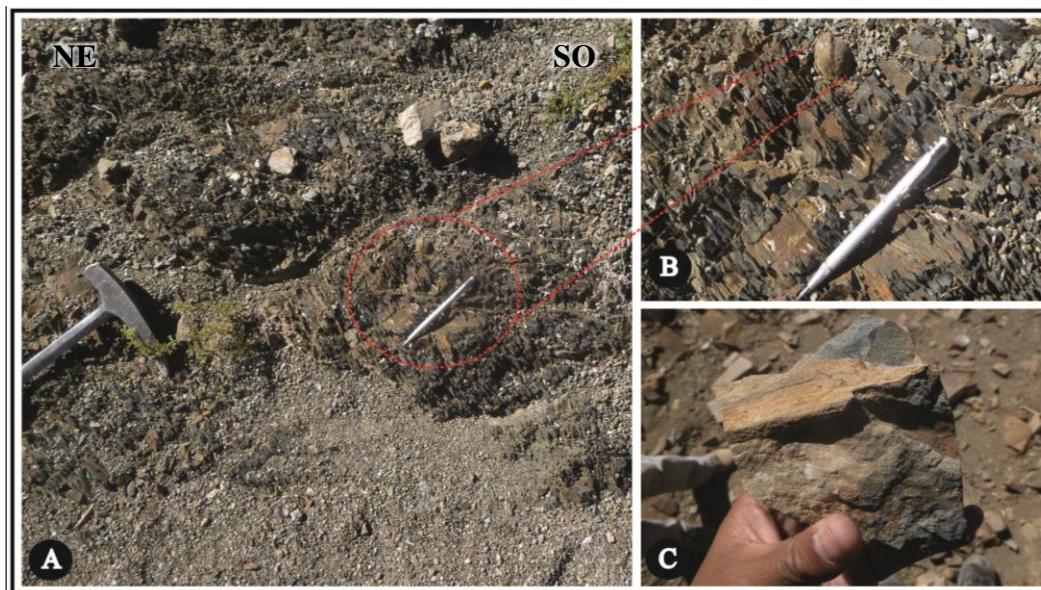


Figura 22: A) Limolitas negras fisibles correspondientes al Grupo Ambo. B) Fósil de bivalvo en limolitas negras. C) Fósil de una planta, característico del Grupo Cabanillas que fueron estudiados y descritos anteriormente por Monge & Cervantes., 2000; Pino et al., (2002).

FORMACIÓN CHOCOLATE (Ji-Cho)

La Formación Chocolate ha sido definida por Jenks, (1948) en Yura (Localidad Tipo), Arequipa. Wilson & García (1962), definieron como Formación Junerata a una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica predominantemente, con intercalaciones de rocas sedimentarias de origen marino que sobreyace al Grupo Cabanillas en discordancia paralela, e infrayace de igual forma a la secuencia calcárea de la Formación Pelado (Monge & Cervantes, 2000) del cual actualmente se le considera como Formación Chocolate. Según Acosta et al, (2011), la Formación Chocolate esta diferenciada en dos miembros, Miembro inferior (volcánico, Fm. Junerata) y Miembro superior (sedimentario, Fm. Pelado).

La Formación Chocolate corresponde al Jurásico inferior, por sus características petrográficas, posición y relaciones litoestratigráficas similares. En los alrededores de las localidades de Causuri, el Ingenio y Buena Vista afloran rocas pertenecientes a esta unidad litoestratigráfica (Fig. 23), así mismo desde el Cerro Condorine hasta el SE del Cerro Tarujane se extiende a lo largo de 12 Km en dirección andina (NO-SE) con un espesor promedio de 4,5 Km, abarcando el Cerro Niquela y parte de la Quebrada Yangane.

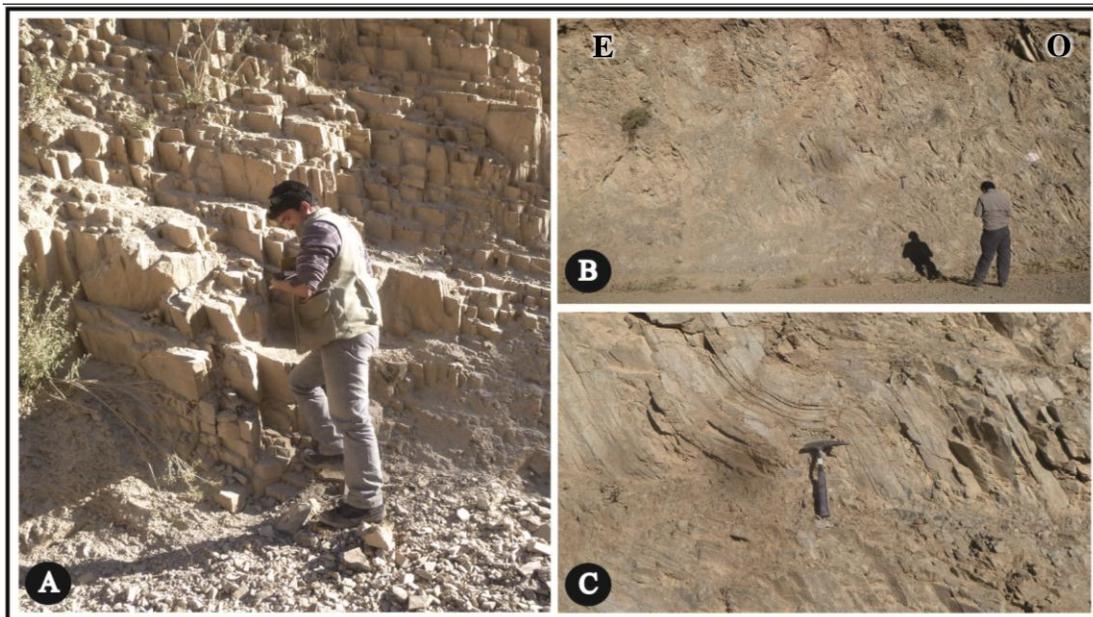


Figura 23: En A) Lavas andesíticas pertenecientes a la Formación Chocolate al sur de Causuri, formando estructuras columnares (disyunción columnar) debido al rápido enfriamiento de estas lavas. B) y C) Deformación dúctil en lavas afaníticas (plegamientos) (400371E/ 8035153N).

FORMACIÓN PELADO (Ji-p)

Denominado así por Wilson & García, (1962), describiendo una secuencia calcárea que afloran en el Cerro Pelado (Fig. 24). Litológicamente está conformada de una secuencia basal de limolitas calcáreas grises claras en capas delgadas, con niveles de calizas silicificadas en la parte superior, además se registran fósiles, seguido de limolitas calcáreas gris oscuras en capas delgadas y fisibles intercalados con limolitas verdes. La Formación Pelado marca el inicio de un proceso continuo de sedimentación marina en la Cuenca Arequipa y refleja una etapa de quiescencia en la actividad magmática del volcanismo Chocolate (Pino, 2003).

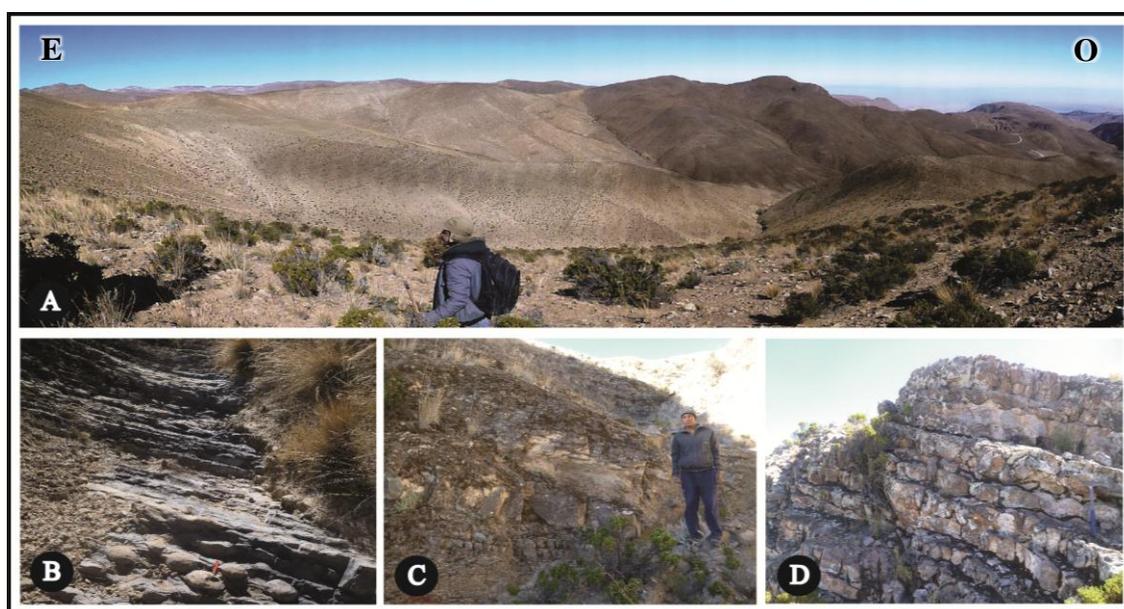


Figura 24: A) Afloramientos de la Formación Pelado. B) Calizas negras con abundantes nódulos. C) Intercalaciones de calizas grises y limolitas, con presencia de ammonites de ~25cm de diámetro. D) Calizas mudstone grises con abundante bioturbación (404562E/8031372N).

FORMACIÓN SOCOSANI (Jm-so)

Fue descrita originalmente por Jenks, (1948) en las cercanías de Socosani, Arequipa (Localidad Tipo). En la región de Tacna Wilson & García, (1962) la definieron anteriormente como Formación San Francisco, refiriéndose a una secuencia sedimentaria localizada al noreste de Pachía, precisamente en la desembocadura de la Quebrada Palca, Quebrada Curviri (Fig. 25) en la Pampa San Francisco con un espesor aproximado de 650 m. En la zona de estudio aflora en las quebradas de Ataspaca y Palca (inmediaciones del poblado de Palca). Esta Unidad yace en disconformidad sobre la Formación Chocolate y suprayace al Grupo Yura. Litológicamente está constituido hacia la base de una secuencia

de cuarcitas pardo amarillenta intercalada con limolitas de color gris oscuro en capas delgadas fuertemente disturbadas por fallas pequeñas, seguido de calizas y limolitas calcáreas gris oscura en capas delgadas en algunos casos característicamente laminar.

También se registró afloramientos de la unidad Socosani en la Quebrada Tocuco, infrayaciendo al Grupo Yura, donde los estratos bien definidos compuestos por calizas grises intercalado con limolitas finas, esta misma relación estratigráfica puede notarse en la Quebrada Curviri donde se aprecia las intercalaciones antes mencionadas.



Figura 25: A) y B) Estratos de areniscas calcáreas intercaladas con limolitas gris oscuras. C) Laminación paralela de calizas wackestone de color gris oscuro. (404562E/8031372N).

GRUPO YURA

Se trata de un potente apilamiento sedimentario que aflora en aproximadamente 1400 m de espesor en el departamento de Tacna. Inicialmente se le reconoció en Arequipa como Formación Yura del Jurásico superior al Cretácico inferior por Jenks (1946) en Yura, y posteriormente fue elevado a la categoría de “grupo” por Wilson & García, (1962) en Tacna. En el departamento de Tacna como Grupo Yura se las conocía a las formaciones Ataspaca y Chachacumane (Vicente, 1981) (Fig. 26), aunque se trata de una denominación local en esta región, las que se encuentran aflorando en diferentes partes aisladas de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) con una dirección N-S y con inclinación hacia el Oeste. Estas formaciones son equivalentes a los miembros descritos por Jenks (1948) y Benavides (1962) en Yura. A este grupo le corresponden las siguientes formaciones:

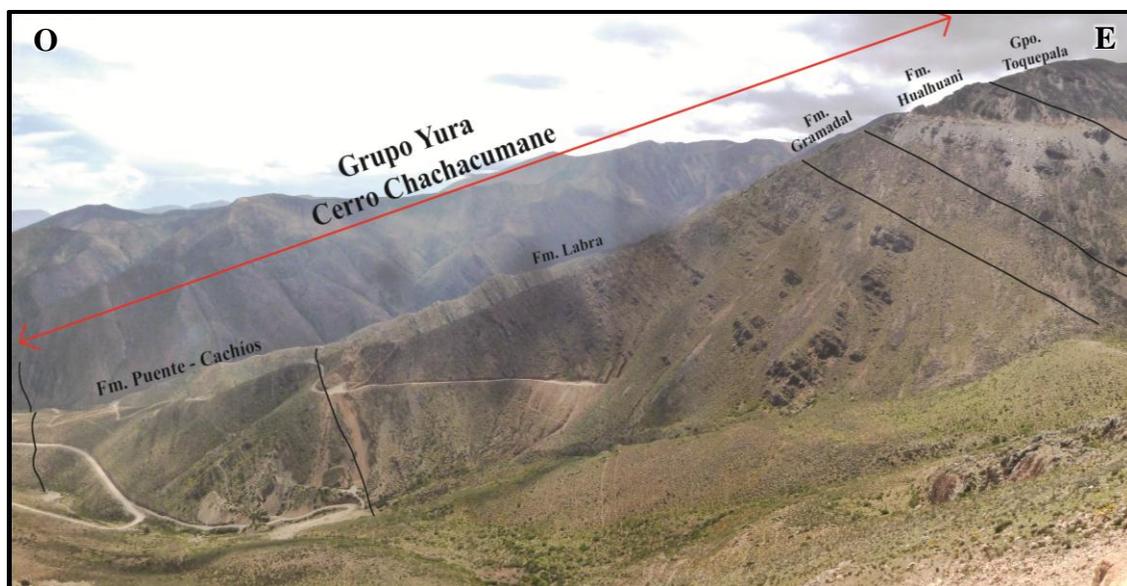


Figura 26: Afloramiento del Grupo Yura, en el Cerro Chachacumane (al Este de la localidad de Chulpapalca), donde se observa todas las formaciones pertenecientes a este Grupo.

a. FORMACIÓN PUENTE (Jm-p)

Inicialmente al considerarse el Grupo Yura como formación, la actual Formación Puente estaba considerada con la categoría de miembro por Jenks, (1948). Posteriormente los afloramientos de esta unidad, reconocida por Wilson & García., (1962) como Formación Ataspaca, ha sido reconocido en la Quebrada Quilla al NE de la localidad de Chulpapalca y en la localidad de Ataspaca (en este sector alterados por el Batolito Challaviento), sobreyaciendo a la Formación Socosani en un contacto gradacional e infrayaciendo concordantemente a la Formación Labra. Litológicamente está compuesta hacia la base por una intercalación de lutitas y limolitas grises verdosas pardo amarillentas en capas delgadas de areniscas cuarzosas grises con tonalidades verdosas (Fig. 27A).

b. FORMACIÓN CACHÍOS (Jm-ca)

La Formación Cachíos del Grupo Yura, fue nombrada por primera vez por Jenks (1948) y Benavides (1962), posteriormente Vicente (1989), Cervantes, (Inédito) y Acosta et al, (2009) hacen mención bajo esta denominación a una serie de lutitas con esporádicas intercalaciones de areniscas canalizadas con *slumps* y conglomerados lenticulares, en la región de Arequipa. En Pachía y Palca (Tacna), Wilson & García (1962) correlacionan estratigráficamente estas unidades con la parte superior de la Formación Ataspaca. Los

afloramientos de esta unidad hallados en el cuadrángulo de Palca se ubican en la Quebrada Quilla, Chachacumane y Chulluncane al ENE de Palca, anteriormente se consideraba ausente a la Formación Cachíos, sin embargo Monge & Cervantes (2000) reportaron un aumento en la distribución de lutitas, perteneciente a esta formación, además se concluye que es muy complicado determinar el límite entre la Formación Puente y la Formación Cachíos especialmente en el extremo sur del territorio peruano. A escala regional, la Formación Cachíos en imágenes satelitales se reconoce por sus estratos que muestran flexuras probablemente asociado a *slump* (Fig. 27B) o plegamientos sinsedimentarios.

c. FORMACIÓN LABRA (Js-l)

Wilson & García (1962) la describieron como Formación Chachacumane, siendo la localidad tipo el Cerro Chachacumane, además esta unidad está aflorando en las vertientes occidentales del Cerro Sarani, en la Quebrada Curviri y en la Quebrada Chachacumane, así como en las quebradas Quilla y Ataspaca donde se observa buenas condiciones para su estudio. Litológicamente está constituido por una serie siliciclástica, la base constituida por limolitas en capas delgadas fisibles y arcillosas (Fig. 27C), muy esporádicamente presenta capas de areniscas, con suaves plegamientos sinsedimentarios, el nivel medio está conformado por intercalaciones de lutitas negras con laminación interna paralela de hasta 5 m con areniscas de grano fino a medio interestratificado con limolitas gris oscura en paquetes de hasta 10 m con predominio de areniscas, culminando en capas medias a gruesas de areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio.

d. FORMACIÓN GRAMADAL (Js-g)

Es una secuencia detrítica y pelítica, parcialmente calcárea, con relativo contenido orgánico, los cuales se han depositado en concordancia con la Formación Labra y subyacen concordantemente a la Formación Hualhuani. Sus afloramientos se presentan al Este de Chulpapalca, en las quebradas Quilla y Chachacumane, también se encuentra en la quebrada del Río Caplina, de manera interrumpida por el Batolito Challaviento y particularmente asociado al Sistema de Fallas Incapuquio (SFI). Litológicamente está constituida por areniscas arcillosas de estratificación delgada intercalada con limolitas gris oscura en paquetes medianos, limolitas negras característicamente laminar interestratificado

con pequeñas láminas de óxidos de hierro. También se observa calizas micríticas orgánicas (Fig. 27D) oscuras en capas medianas a delgadas.

e. FORMACIÓN HUALHUANI (Ki-hu)

Denominado por Wilson & García., (1962), como Formación Chachacumane, se encuentra expuestos en las quebradas, Chulluncane, Chachacumane y Quilla, donde se puede observar con más detalle. La Formación Hualhuani, alcanza una potencia de 250 metros en el Cerro Chachacumane. En el Río Caplina ésta secuencia se interrumpe por la presencia del Batolito Challaviento, al sureste de Copapuquio. La Fm. Hualhuani sobreyace concordantemente a la Formación Gramadal e infrayace disconforme a la Formación Huilacollo. Esta secuencia de cuarcita conforma la parte superior del Grupo Yura, y marca la sedimentación marina del área de estudio. Litológicamente consiste en cuarzoarenitas con un 90% de granos detríticos de cuarzo redondeado a subredondeado (Fig. 27E) y algunos granos de zircón, y de gran madurez textural (redondeados). Esta unidad sobreyace concordantemente a la Formación Gramadal e infrayace en disconformidad a la Formación Matalaque.

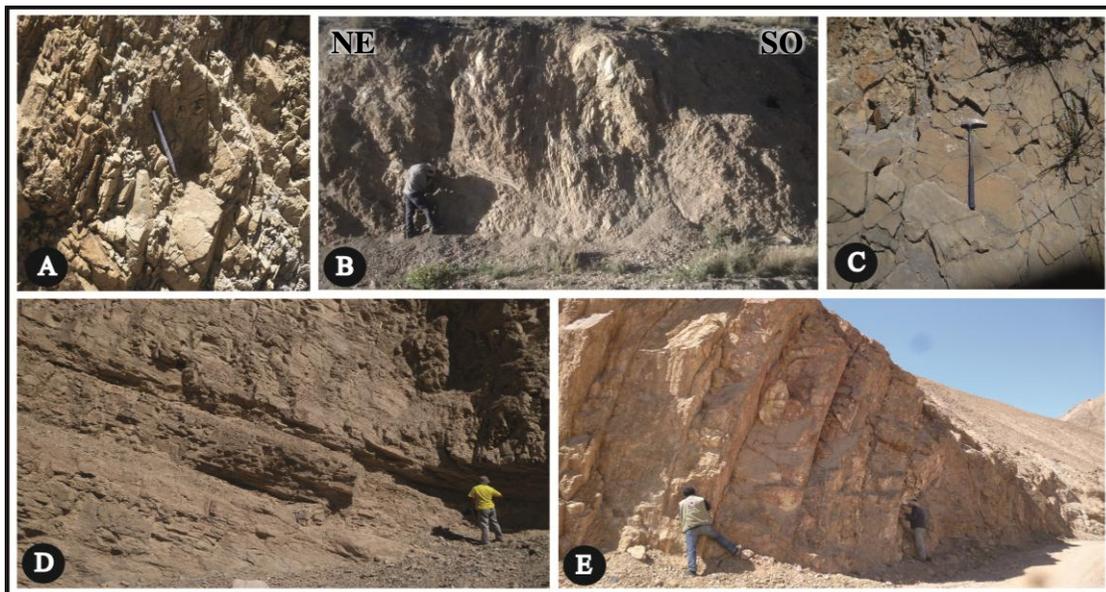


Figura 27: Afloramientos que conforman el Grupo Yura, donde en las imágenes A, B, C, D y E corresponden a las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani.

FORMACIÓN MATALAQUE

Denominado por Wilson & García, (1962) como Formación Chulluncane. Tiene su mejor exposición en el cerro homónimo, y además afloran en las quebradas Quilla, Chachacumane y Chulluncane. Litológicamente se caracteriza por la presencia de aglomerados y derrames de lavas andesíticas gris verdosas (alteración propilítica). Esta alteración se observa con determinación en la carretera a Tarata, a lo largo de aproximadamente 3 km. Estas rocas predominantemente poseen una textura porfídica y algunos niveles de lavas afaníticas de color rojo parduzco, con esporádicos niveles de tobas. En la parte superior se tiene aglomerados compactos con clastos bien redondeados de cuarcitas, calizas, y andesitas en una matriz andesítica y dacítica (alterados).

GRUPO TOQUEPALA

Wilson & García., (1962), destacaron un afloramiento continuo de esta serie hasta el cuadrángulo de Palca (36x), donde se muestra la Formación Quellaveco con su unidad Samanape. En los cuadrángulos adyacentes, estas rocas fueron descritas como tal en los estudios realizados por Bellido & Guevara (1963), describiendo una gruesa serie discordante de rocas volcánicas intercaladas con conglomerados en el Sur Peruano. Posteriormente, Laughlin et al. (1968) realizaron estudios en los que reconocieron al Grupo Toquepala.

FORMACIÓN QUELLAVECO

UNIDAD SAMANAPE

Esta unidad aflora en el cuadrángulo de Palca (36x), en las quebradas Viñani, Cobani, Challapujo y Vilavilani y en el Cerro Chare limitado con el Cuadrángulo de Pachía (36v). Litológicamente se caracteriza por presentar hacia la base secuencia de lavas coherentes de composición andesítica de textura porfídica de color gris con intercalación de tobas; secuencia de tobas lapilli, gris claras a rojizas estratificadas con formas redondeadas en afloramiento, está compuesta de fragmentos líticos polimícticos (volcánicos), pómez en una matriz tobácea alterada, algunos sectores presentan textura eutaxítica. Sobreyace disconforme a la Formación Chocolate e infrayace con ligera discontinuidad a la Formación Moquegua siendo intruida por el Batolito Yarabamba.

GRUPO TACAZA

FORMACIÓN TARATA

Descrita por Jaén, (1965), aflora principalmente en la localidad tipo del mismo nombre, esta formación volcano-sedimentaria alcanza su mayor desarrollo en los alrededores del pueblo de Talabaya y se diferencian dos miembros:

Miembro Inferior: Esta unidad aflora en el Cerro Tijerani nacientes de la Quebrada Chuñave, en el Cerro Talane y Cerro Tacata. Litológicamente está constituido por tobas soldadas, brechas, conglomerados y algunos derrames lávicos porfiríticos de andesitas de color marrón a gris rojiza, que se intercalan con tobas poco soldadas gris blanquecina en capas gruesas.

Miembro Superior: Litológicamente está constituido por una secuencia volcano-sedimentaria, conformada por tobas gris clara bien compactado con presencia de cuarzo, biotita y pómez, intercalada con areniscas tobáceas.

FORMACIÓN HUILACOLLO

Su afloramiento típico se localiza en el Cerro Huilacollo. Esta unidad consiste en derrames andesíticos y piroclásticos a modo de brechas, aglomerados y tobas que tienen coloraciones verde violáceo, muestra superficies suaves a modo de lomadas, expuestos principalmente en los cerros Azangune y Cariacaca. Litológicamente está compuesto por intercalaciones de brechas andesíticas, tobas dacíticas con buena estratificación, con niveles de areniscas tobáceas (Monge & Cervantes., 2000), esta formación sobreyace disconforme a la Formación Hualhuani y Matalaque e infrayace ligeramente disconforme a la Formación Huaylillas.

FORMACIÓN MOQUEGUA

Esta unidad aflora al sureste del cuadrángulo de Palca (36x), localizados principalmente en los cerros Pulaca, Parapuna, Curusune, y las quebradas Cobani, Viñani y Tembladera, además en la localidad de Chuschuco alcanzando un grosor que fluctúa entre los 100 y 300m. Litológicamente está constituido por conglomerados en capas gruesas a medianas con clastos que alcanzan los 30 cm de diámetro redondeado a subredondeado en una matriz

areno - limosa, de regular clasificación. Esta unidad sobreyace disconforme a la Formación Quellaveco e infrayace en conformidad con tobas de la Formación Huaylillas.

FORMACIÓN HUAYLILLAS

Aflora al sur del cuadrángulo de Palca (36x) desde la Quebrada Vilavilani hasta el límite con el cuadrángulo de Huaylillas, otros afloramientos hacia el norte tenemos en las cimas de los cerros Pulune, Titine, Palca, Huanune y la Chulpa (Quebrada Palca) (Monge & Cervantes, 2000), siendo más común las ignimbritas de color beige-marrón vitrocristalina. Tanto en la litología como en el grosor de esta unidad presenta fuertes variaciones.

Miembro inferior: litológicamente constituida por tobas de color beige a blanco rosáceo, de composición riodacítica de grano fino a medio, contiene plagioclasa, cuarzo y biotitas.

Miembro Superior: Litológicamente constituido por tobas riolíticas a riodacíticas de color rosado, con presencia de algunos niveles de pómez hasta de 3 cm.

GRUPO BARROSO

Este volcanismo que aflora ampliamente en el sector NE del cuadrángulo de Palca ha sido estudiado y diferenciado; reconociendo estrato volcanes, centros volcánicos y complejos volcánicos además estructuras volcánicas de tobas y flujos lávicos por su posición litoestratigráfica se le considera Neógeno – Cuaternario (Monge & Cervantes., 2000).

DEPÓSITOS CUARTERNARIOS

A lo largo de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x), estos depósitos se acomodan a la topografía del terreno, siendo de mucha importancia para la neotectónica. Entre ellos, Depósitos coluviales, glaciario-fluvial, volcánico, aluvial, fluvial, etc. La estratigrafía la plasmamos en una columna generalizada (Anexo N° 3) y el mapa geológico (Anexo N° 2).

3.7.2. GEOMORFOLOGÍA

La forma actual del relieve es consecuencia de la conjunción de muchos factores que acompañaron al levantamiento andino, esto se refleja en las diversas geoformas que se han formado en el sur peruano, siendo tres las principales: colinas, valles y escarpes (Sébrier et al., 1988).

Si realizamos un corte SO-NE (perpendicular a las estructuras andinas) a su vez perpendicular a la línea de costa, hasta la Cordillera Occidental tendremos un mejor panorama de las unidades geomorfológicas y su relación con la tectónica regional. La topografía fluctúa entre alturas que van desde los 500 m hasta 1000 m de altitud.

La forma del relieve y la topografía actual en el Sur del Perú es una consecuencia de muchos procesos geológicos a lo largo de la historia geodinámica de Tacna. La zona de investigación presenta una amplia diversidad de relieves que han sido consecuencia de la interacción de muchos factores que acompañaron al levantamiento andino; siendo los principales factores: tectonismo y vulcanismo a gran escala, además las zonas climáticas de los Andes son paralelas a la morfoestructura orogénica (Alván, 2009), donde el clima presenta un papel importante en el desarrollo de la topografía mediante la erosión.

En la región sur del Perú se han definido 7 unidades geomorfológicas, las cuales a la vez coinciden con las 5 unidades morfotectónicas propuestas por Carlotto et al. (2009) para el sur peruano descritas a continuación:

- **La Cordillera de la Costa:** Esta morfoestructura está constituida principalmente por terrenos precámbricos (gneis) pertenecientes al Complejo Basal de la Costa, esta cordillera corresponde a una cadena de montañas con elevaciones bajas, presentando altitudes de hasta 393 msnm en el Cerro Siete Colores.
- **Planicies costaneras:** Las pampas o planicies costaneras se desarrollan entre los 200 a 1200 msnm, sobre una faja que alcanza los 45 km de ancho, está limitado en su borde por la Cordillera de la Costa y al norte por las montañas que conforman la Ladera Pacífica de la Cordillera Occidental.
- **El Arco Volcánico Barroso:** Esta cadena volcánica localmente presenta una dirección norte-sur. En esta morfoestructura se registran algunos de los puntos más altos de la región (Pino, 2003), como por ejemplo el Nevado del Barroso que culmina en 5700 m.s.n.m. Estas acumulaciones volcánicas post-orogénicas están constituidas por lavas, brechas de flujos, aglomerados, tobas e ignimbritas de composición andesítica y traquiandesítica.
- **La Cordillera Occidental:** Esta morfoestructura presenta una orientación NO-SE. La Ladera Pacífica es coronada por los nevados y estructuras volcánicas que conforman la

Cordillera Occidental. Estas elevaciones se desarrollan por encima de los 4000 msnm, siendo las más altas de la región. El mejor ejemplo de estas elevaciones es el Nevado Barroso, cuya cumbre supera los 5500 msnm. Esta morfoestructura presenta un relieve accidentado, con pendientes fuertes debido al ciclo andino compresivo generó la Cordillera de los Andes.

- **Superficie Huaylillas:** La Superficie Huaylillas ha sido generada por la erosión de las tobas Miocenas del mismo nombre. Coincidentemente se desarrolla en el miembro superior de dicha formación, presentando una superficie encalaminada o surcada, debido a las múltiples quebradas rectas y además paralelas entre estas, con una profundidad muy baja, esta morfoestructura es visible con precisión en las imágenes satelitales. Acosta et al., (2011), sostiene que debido a su extensión y espesor llegan a considerarse como una unidad geomorfológica importante.
- **El Altiplano:** En la región tacneña se tiene una pequeña área altiplánica, ubicada al este del departamento, en el lado nororiental de la Cordillera del Barroso. Esta unidad geomorfológica alcanza su mejor desarrollo en Bolivia. Consiste de extensas pampas situadas sobre los 4100 msnm.
- **Los Valles:** Los valles han sido socavados como consecuencia del desnivel producido por el levantamiento andino. Estos exhiben distinto desarrollo de noreste a suroeste, presentando la mayor socavación y pendiente hacia sus nacientes. En la región noroeste los valles presentan secciones en forma de “V” y en la región suroeste valles en forma de “U”.

Comprender la geomorfología es importante para relacionarlo con los procesos tectónicos que han sido los responsables de su formación, así mismo ayuda a comprender que estructuras regionales controlaron la geometría de estas morfoestructuras y está plasmado en un mapa Geomorfológico (ver Anexo N° 2).

3.7.3. HIDROLOGÍA DE TACNA

La creciente escasez de agua en el Sur del Perú y especialmente en la región de Tacna, es un factor que limita el factor socioeconómico regional por lo que es necesario tomar medidas urgentes para afrontar esta problemática.

Ante estas consideraciones, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) viene implementando a nivel de cuencas hidrográficas previamente priorizadas, la elaboración de Estudios de recursos Hídricos Superficiales con objeto de evaluar los recursos hídricos de las cuencas (Ver Anexo N°2), y así definir las condiciones para su óptima explotación. La región de Tacna está dividida hidrológicamente en tres cuencas de gran importancia.

CUENCA DE LOCUMBA: La cuenca del río Locumba se encuentra ubicada en la región de Tacna y tiene una extensión de 5 742.3 Km², de las cuales 505 km² corresponde a la cuenca húmeda, es decir aquella porción localizada por encima de los 3900 msnm y que aporta sensiblemente los recursos al escurrimiento superficial que tiene sus nacientes en la parte alta de la región, extendiéndose hasta el océano pacífico.

CUENCA DEL SAMA: La cuenca del Río Sama tiene un área de drenaje de 4615,65 km², desde sus nacientes hasta la desembocadura en el océano pacífico. La longitud máxima de su recorrido es 128,98 Km² aproximadamente, con una pendiente promedio de 2,7% en el tramo de la zona costera hasta la parte media, ésta pendiente llega a 13,7% en la zona alta.

CUENCA DE CAPLINA: La cuenca del Río Caplina se ubica desde la Faja Costanera, límite con el Océano Pacífico hasta el flanco occidental de los Andes del departamento de Tacna. Hidrográficamente la Cuenca del Río Caplina tiene sus nacientes en la Cordillera del Barroso, hasta la desembocadura en el Océano Pacífico. Políticamente se encuentra en el departamento de Tacna, Alto de la Alianza, Cnel. Gregorio Albarracín, Ciudad Nueva, Calana y Pachía.

3.7.4. CLIMA

Debido a que en la zona de investigación se presentan diferentes condiciones climáticas, variando de acuerdo a la altitud, pasaremos a describirlos desde los más bajos y cálidos hasta los más altos y fríos (Salinas, 1987). Durante el día el calor fluctúa entre 25°C y 28°C, y en el verano alcanza alrededor de 30°C. Respecto a la climatología de la región Tacna, algunos autores consideran su estudio por cuencas, es decir debido a que las estaciones meteorológicas en esta región se ubican entre las tres grandes cuencas que existen (Cuenca Locumba, Sama y Caplina). Siendo así, se detalla los parámetros climáticos o meteorológicos a continuación:

3.8. CONTEXTO ESTRUCTURAL Y REGIONAL

La arquitectura estructural en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) son mayormente consecuencia de las últimas fases y eventos tectónicos de deformación andina, ya que los principales e importantes registros que evidencian y definen una falla son los denominados indicadores cinemáticos, estos inicialmente poseen un patrón geométrico (dirección, rumbo, buzamiento, pitch, vergencia) que al ser afectados por la reactivación de la falla es muy probable que las estrías iniciales se “reseteen”, lo cual implica que generalmente en campo se observará los últimos eventos.

Existe una teoría que explica la actividad tectónica del Sistema de Fallas Incapuquio durante la formación de la Cuenca Mesozoica Arequipa durante el Jurásico, en el Sinemuriano (199,3 Ma, Jurásico Inferior) empezó a depositarse de la Cuenca Arequipa, cuya configuración topográfica consistía de una zona alta denominada hasta la actualidad como Cordillera de la Costa, en cambio entre la zona de Yura – Arequipa y Pachía – Palca en Tacna se depositaban sedimentos continentales y marinos en evidente régimen distensivo. Acosta et al., (2010). Sin embargo existen investigaciones que demuestran que la actividad geodinámica de la Cuenca Arequipa se inició muy probablemente en el Triásico Superior.

3.8.1. SISTEMA DE FALLAS INCAPUQUIO (SFI)

Wilson & García., (1962) mencionan los trabajos realizados por la Comisión Carta Geológica Nacional en los cuadrángulos aledaños de Tarata (35v) y Moquegua (35u). Indican que la falla principal es una continuación al sureste de la Falla Incapuquio que Barúa, (1961) ubicó en los alrededores de Toquepala. Posteriormente Bellido & Guevara., (1979) en la elaboración del Cuadrángulo de Moquegua reafirma que el rasgo estructural más importante del Sistema de Fallas Incapuquio tiene dirección NO-SE. Además menciona que estas fallas en cierta forma han controlado el emplazamiento de los cuerpos monzoníticos y dacíticos, así como la formación de las chimeneas de brecha, con las cuales se asocian los yacimientos de cobre de Toquepala, Quellaveco y Cuajone.

Jaén, (1965) en la elaboración del Cuadrángulo de Tarata (35v) menciona que la Falla Incapuquio es una falla reconocida y mapeada desde la frontera con Chile que posee un patrón direccional de N 50° O.

El Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) fue estudiado y planteado como un conjunto de fallas transpresionales, que a su vez, incluyen estructuras en flor (Jacay et al., 2002), a escala regional, Monge & Cervantes., (2000) elaboraron un mapa actualizado de Pachía (36v) y Palca (36x) con nuevas observaciones en la correlación de las unidades mesozoicas, tres años más tarde; Pino, (2003), de acuerdo a sus observaciones de campo, considera que el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) ya estaba activo durante la formación de la cuenca marginal, la cual profundizaba hacia el suroeste, y la evidencia de una serie de fallas sinsedimentarias, generadas en el Jurásico inferior y medio, concuerda con la orientación del Sistema de Fallas Incapuquio y Challaviento, lo que también sugiere que el SFI estuvo activo durante el rifting.

El dominio y extensión del Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) es muy amplio y bastante complejo, puesto que contiene fallas activas e inactivas a lo largo de su historia geológica, las fallas asociadas al SFI se describen a continuación:

3.8.2. FALLA CHALLAVIENTO

La Falla Challaviento sale desde la intersección con la Falla Incapuquio en la Quebrada Teninguirre, sigue su trayectoria en dirección SE pasando cerca al Cerro Palquilla, atravesando la Quebrada Chaslani, cerca al sitio donde ésta última cruza a la Quebrada Chero. Inicialmente esta falla presenta un rumbo NO-SE, conforme seguimos su trayectoria hacia el sureste se va horizontalizando en la localidad de Charicahua, tomando en su último tramo un rumbo aproximado de E-O. Wilson & García., (1962), observan que a lo largo de su trayectoria, la Falla Challaviento es cuasi paralela a la falla Incapuquio con una distancia de desfase aproximadamente entre 3 a 4 Km.

Pino, (2003) en su tesis de grado considera que la Falla Challaviento junto a la Falla Incapuquio forma una rombo estructural asimétrico y a su vez esta estructura representa un primer bloque con mayor exhumación.

En su recorrido por el Cuadrángulo de Pachía (36v), afecta rocas del Jurásico y Cretácico que están ubicadas entre la Quebrada Chero y Cerro Chari al noreste del cuadrante I del Cuadrángulo de Pachía (36v). Esta falla entrelaza con la Falla Incapuquio en el sector NE de Mal Paso configurando estructuras con dirección E-O. En cambio en el cuadrángulo de Palca (36x), la Falla Challaviento recorre sectores comprendidos desde el Cerro Ticana al

oeste de Ancoma hasta el río Caplina al este del poblado de Caplina. (Acosta et al., 2008; Acosta et al., 2011).

Es una falla de gran importancia, en general tiene una dirección NO-SE, siendo de tipo inverso, con componente sinistral y con buzamiento mayor a 70° hacia el NE. Esta falla en casi todo su recorrido pone en contacto rocas intrusivas pertenecientes al Batolito Challaviento sobre rocas detríticas pertenecientes a las formaciones del Grupo Yura, además esta falla es responsable que la Formación Chocolate se encuentre estratigráficamente encima de la Formación Pelado, confirmando su carácter inverso.

3.8.3. FALLA HUACANO

Esta falla es de gran importancia, ya que debido a su posición espacial y geometría se cree que es parte del rombo estructural (Sempere & Jacay., 2002; Pino, 2003), sin embargo esta falla tiene una vergencia hacia el SO (Cervantes, 2016, comunicación oral), donde estudios del año 2003 por Martínez & Cervantes., 2003 (No publicado) evidencian esta falla al oeste del Cerro Machani, y está íntimamente relacionada a la cinemática del Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) debido a que a través de esta se emplaza la Unidad Milonita.

3.8.4. FALLA ESTIQUE PAMPA

Esta falla de menor categoría que las fallas Incapuquio y Challaviento, pero de gran importancia estructural. La Falla Estique es de carácter inverso y está ubicada en el extremo noreste del Cuadrángulo de Pachía (36v), llegando hasta el NO del cuadrángulo de Palca (36x). En el sector de Estique Pampa hasta el Cerro Talane dicha falla presenta un rumbo cuasi vertical (NNO - SSE), en el tramo central entre el Cerro Talane y Palquilla se puede ver con una traza bien notoria su dirección NO-SE y hacia el sureste en su último tramo hasta la Quebrada Coalaya la falla presenta un rumbo horizontal E-O. (Acosta et al., 2011).

La Falla Estique Pampa de dirección NO-SE y con un buzamiento entre 50° y 60° hacia el noreste, tiene componente de rumbo sinistral al igual que la Falla Challaviento. Es además del tipo inversa porque hace sobreponer a las formaciones jurásicas de Chocolate y Pelado con la Formación Tarata, de edad Eoceno. En el sector del Cerro Uquivalle, al sur de Estique Pampa, esta falla pone en contacto a la Formación Labra del Jurásico superior con la Formación Pelado del Jurásico inferior. Su extensión se aproxima 12 Km desde la localidad Estique Pampa hasta la Quebrada Coalaya.

3.8.5. FALLA PALQUILLA

Esta falla se encuentra ubicada en el poblado de Palquilla, pasando cerca al Cerro Airecollo hasta llegar al flanco noreste del Cerro Yarancirca. Esta falla presenta un rumbo vertical N-S y presenta una extensión de aproximadamente 3 km.

Esta falla logra intersectar a la Falla Incapuquio y la Falla Challaviento, y su notoriedad resalta porque ésta pone en contacto a la Formación Pelado del Jurásico inferior sobre la secuencia volcánica de la Formación Matalaque de edad Cretácico inferior.

3.8.6. FALLA INCAPUQUIO

Esta es la falla principal de la investigación, se denomina así a un conjunto que múltiples fallas que poseen un mismo patrón direccional. Las observaciones realizadas en diferentes estaciones microtectónicas manifiestan la complejidad estructural que posee esta falla. Se considera como Falla Incapuquio a una asociación de fallas de proporciones notables y mapeables a escala regional que se encuentran alineadas o describen una cierta direccionalidad continua. Se encuentra ubicada desde el extremo superior izquierdo del Cuadrángulo de Pachía (hoja 36v1), pasando por la Quebrada Añache, a lo largo de la Quebrada Tauja, hasta la Quebrada Teninguirre; aquí se resalta con precisión el rumbo o dirección promedio que es NO-SE.

Este trazo, a lo largo de toda su trayectoria, manifiesta su naturaleza inversa con evidente componente sinistral. A lo largo de este tramo se puede observar el cabalgamiento del Cerro Machani (Salinas, 1987) que se encuentra en la Quebrada Chero, 2 km aguas arriba de Mal Paso (Fig. 28), donde esta estructura consiste en la ruptura del Zócalo Precámbrico cabalgando mediante un plano de falla inversa de 30° de buzamiento al suroeste, sobre las rocas volcánicas de la Formación Tarata.

Se considera a esta falla como el trazo principal del gran Sistema de Fallas Incapuquio.

En la Figura A, se muestra el plano de falla cuasi vertical. En la figura superior derecha se aprecia “Megamullons”, que son indicadores cinemáticos que determinan el movimiento de la falla, esta falla es clave para entender e interpretar el rombo estructural (Jacay et al., 2002 y J. Jacay, comunicación oral) que ha sido responsable de la exhumación de rocas antiguas en esta zona.

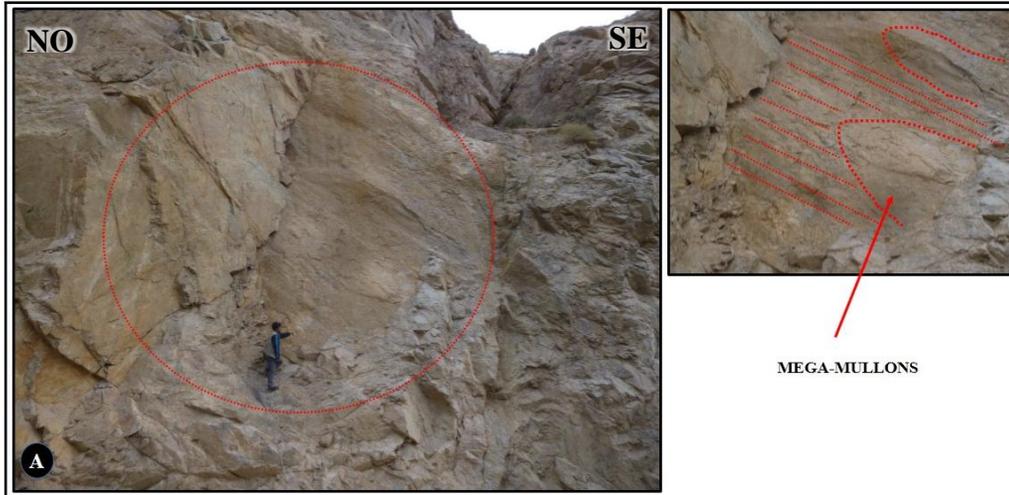


Figura 28: Rocas volcánicas de composición andesítica, de color rojizo en las cuales se registran macro estrías de falla (Mega-Mullons). (UTM 388055E/ 8053866N).

3.8.7. FALLA PALCA

Se denomina así a una falla geológica en base a la cercanía con la localidad homónima en el Cuadrángulo de Palca (36x), tiene una dirección NO-SE con buzamiento promedio de 40° hacia el noreste (Fig. 29). Esta falla se extiende desde el Cerro Pulaca en dirección sureste hasta Guañacahua, y tiene aproximadamente entre 12 y 15 Km de longitud, cabe resaltar que esta falla en los tramos correspondientes al Cerro Niquela y Ventacala presenta inflexiones debidas a la compleja topografía del terreno; sin embargo su importancia se debe a que esta falla es la responsable de cabalgamientos donde rocas volcánicas de la unidad Huaylillas yacen sobre rocas andesitas porfídicas de la Formación Chocolate.

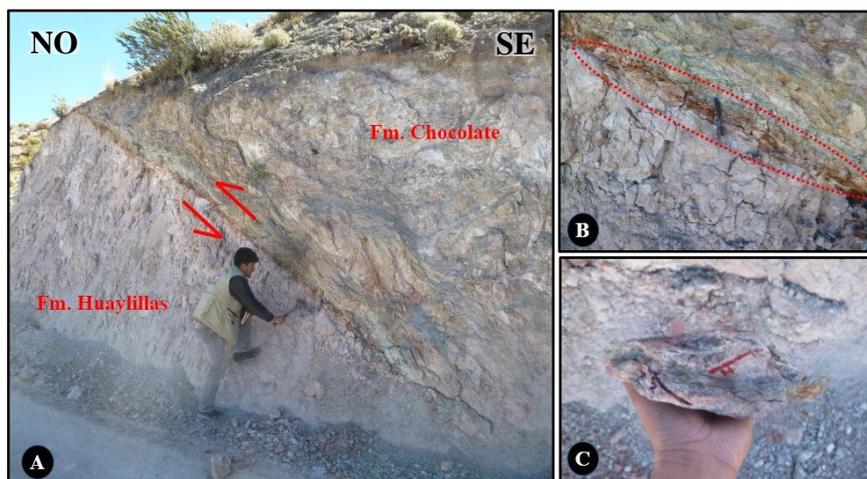


Figura 29: A) Falla inversa donde andesitas de la Fm. Chocolate está sobre tobas de la Fm. Huaylillas. B) Material triturado (panizo) producto de la falla. C) Muestra tomada en el contacto fallado, previamente orientada para estudios en secciones delgadas, (UTM 402442E/ 8029274N).

3.8.8. FALLA CAPLINA

Esta falla es de gran importancia geológica, y corresponde al SFI, de carácter tranpresivo, ya que esencialmente es una falla inversa con componente de rumbo sinistral (Fig. 30), esto se puede evidenciar en el desplazamiento sinistral de bloques de la Formación Pelado a 2 km en dirección NO de Caplina. Su extensión es aproximadamente de 20 Km de longitud, desde el Cerro Caricahua hasta la intersección con la carretera hacia Tarata.

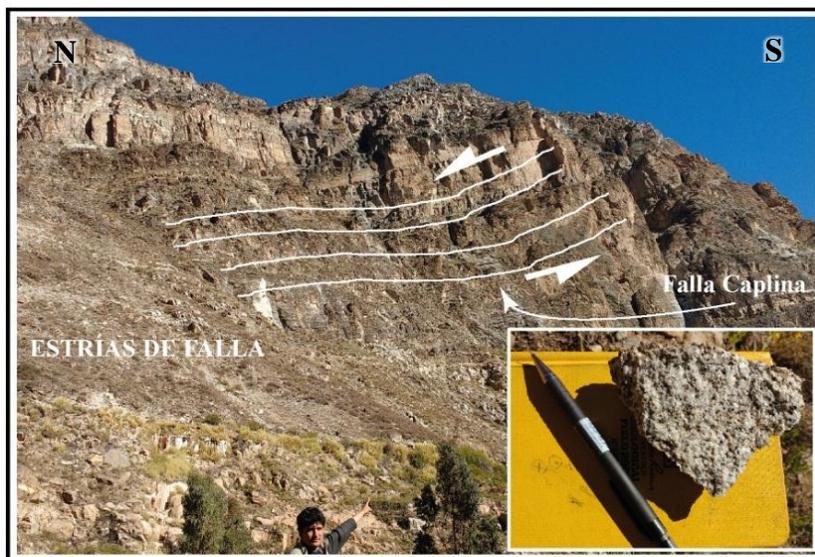


Figura 30: Al este del Poblado de Caplina se tiene afloramientos que atestiguan la actividad de la Falla Caplina (UTM 401764E, 8043613N).

3.8.9. FALLA JUNERATA

Esta falla está ubicada entre el cuadrante I de Pachía (36v) y el Cuadrante III de Palca (36x), de carácter regional, además esta falla juega un rol muy importante dentro de la configuración tectónica de la zona de investigación. Se observa además que mantiene paralelismo con la Falla Incapuquio, por lo cual se considera que es parte del SFI, y es inversa con buzamientos subverticales hacia el noreste (Acosta et al., 2011).

Esta falla en el tramo comprendido entre el Cerro Pulaca y la localidad El Ingenio, se comporta como un cabalgamiento (falla inversa de bajo ángulo) donde afecta a rocas de la misma unidad. La prolongación de esta falla se considera por algunos autores como componente de una estructura romboédrica en cuyo interior afloran rocas pertenecientes al Basamento Metamórfico de Arequipa.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se plotean, integran, analizan e interpretan los datos microtectónicos tomados durante las dos campañas de campo propicias para el procesamiento de datos microtectónicos, donde se ha utilizado el Software FaultKin Win v. 6 para aplicar el criterio de los diedros rectos (De Vicente et al., 1992) hasta llegar a una secuencia de eventos tectónicos que han podido afectar estructuralmente la Cuenca Arequipa en el sur peruano, específicamente en Tacna desde el Jurásico.

4.1.TECTÓNICA

En este subcapítulo de tectónica veremos los procesos asociados a esfuerzos que han logrado generar deformación en las rocas, tanto deformación frágil como dúctil; además la aplicación de métodos microtectónicos (medida de estrías o *slickensides*) para poder explicar la arquitectura estructural de la Cuenca Arequipa en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) en Tacna. Esto nos permitirá tratar de comprender los diferentes eventos tectónicos que han marcado la evolución de la Cordillera de los Andes (Oncken et al., 2006).

En análisis tectónico mediante métodos microtectónicos de la Cuenca Arequipa en los cuadrantes de Pachía (36v-1; 36v-2) y Palca (36x-3; 36x-4), implica analizar la cinemática y dinámica de las principales estructuras o fallas regionales, además de caracterizar su arquitectura; éste análisis puede incluir elementos adicionales de sedimentología, estratigrafía (espesores), petrología, y otras disciplinas dentro de las geociencias. El enfoque final se complementara con estudios microestructurales en secciones delgadas, y con la integración sísmica del subsuelo.

4.1.1. LOS ANDES PERUANOS

La cadena montañosa de los Andes, a lo largo de sus 8000 km de largo y 750 km de ancho máximo es el resultado de la subducción de la Placa de Nazca debajo del Continente Sudamericano (Fig. 31), cuya convergencia registra actividad desde al menos el Jurásico superior (Ramos, 1989) y actualmente presenta una velocidad entre 6 y 9 cm por año. Así también, la inclinación de la placa subducida (*slab*) no es constante entre las latitudes 10°N y 35°S, lo que produce una configuración geológica variable en los Andes Occidentales (Norabuena et al., 1999).

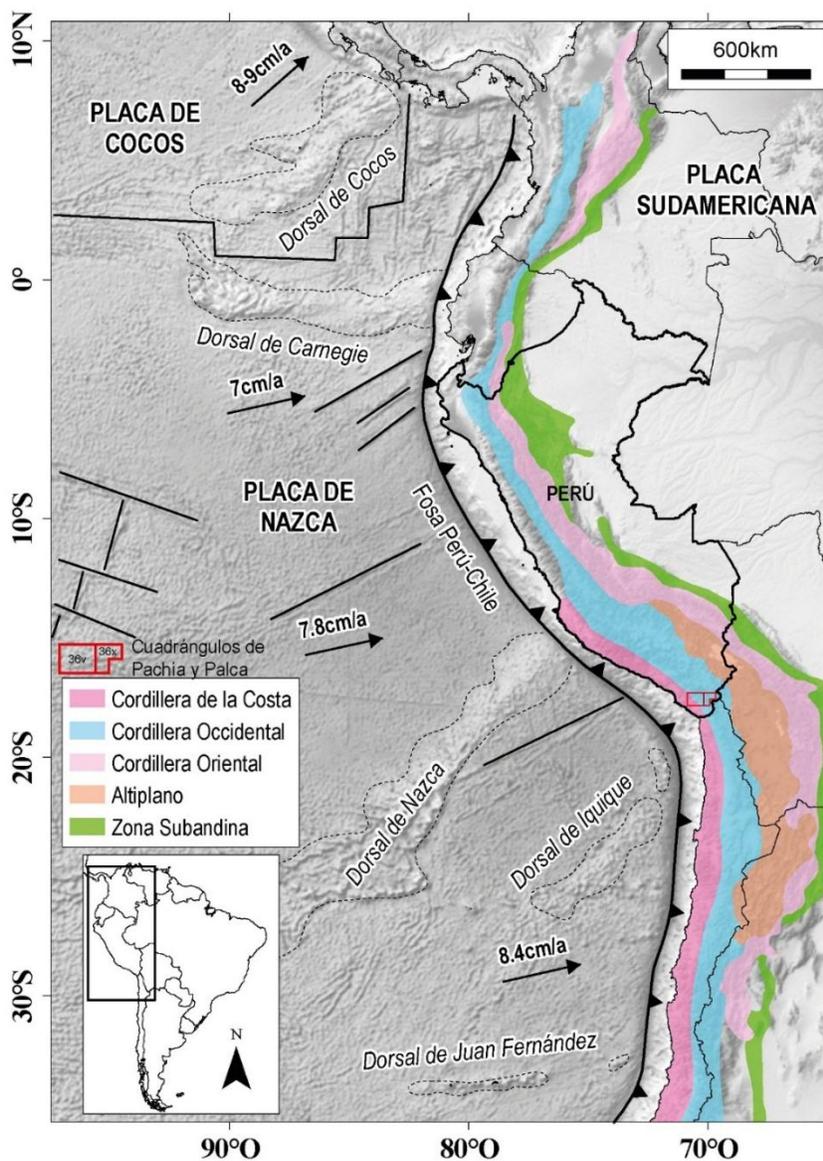


Figura 31: Morfología Andina, producto de la subducción de la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana (tomado de Sébrier et al., 1988).

La tectónica entre el norte y sur del Perú (latitudes 5°S a 14°S) es propia de una subducción plana, ligada a un vulcanismo poco activo como consecuencia de una inclinación del *slab* menor a los 30°, próxima a la horizontalidad debajo de la Placa Sudamericana. Mientras que entre las latitudes 16°S – 27°S, en el sur del Perú y Chile, la subducción es nuevamente normal. Debido a estas diferencias en la inclinación del *slab*, el espesor cortical andino que en promedio es 40 km puede alcanzar los 80 km a razón de la acumulación de material astenosférico debajo de la placa cabalgante.

La tectónica Peruana se caracteriza por una serie de eventos (Fig. 32) definidos en base al grado de deformación y a las discordancias existentes en rocas mesocenoicas (Steinmann, 1929; Megard, 1984). Su duración varía entre miles a algunos millones de años separados por intervalos de quietud relativa que pueden tener una naturaleza continua.

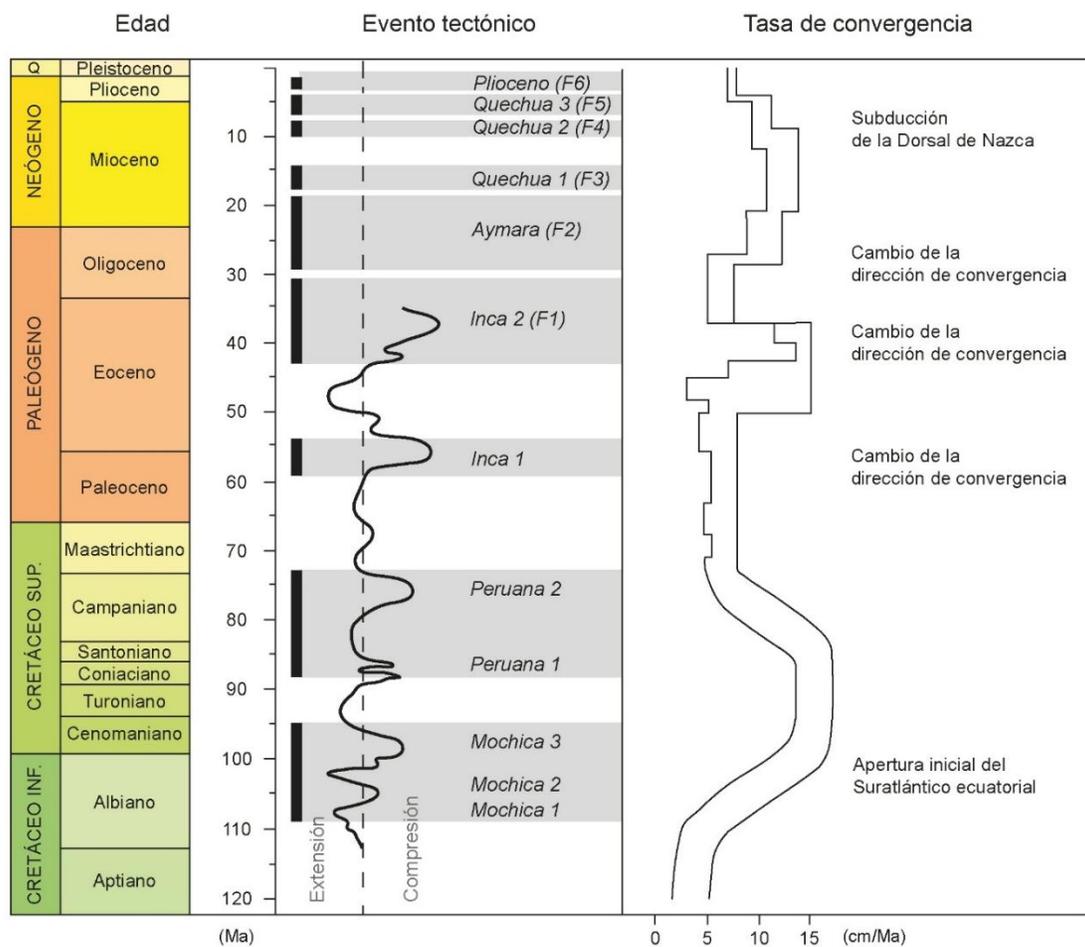


Figura 32: Eventos tectónicos de la margen peruana entre el Mesozoico y el Cenozoico (Modificado de Jaillard, 1999).

4.1.2. ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO Y DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS

En esta sección se hace una descripción de las estructuras a partir del plano geológico y de la arquitectura estructural, considerando su geometría y las medidas microtectónicas para el respectivo análisis (rumbo, buzamiento, pitch y plunge de estrías de falla) a fin de determinar los ejes principales de los paleoesfuerzos que interactuaron durante la era mesozoica en la Cuenca Arequipa, y su evolución tectónica en el sur peruano.

En la presente tesis se ha realizado 38 estaciones microtectónicas entre las dos campañas de campo realizadas por el proyecto GR41 medidas en planos de fallas, cuyas medidas oscilan entre 2 y 10 estrías por cada plano de falla, de acuerdo a la exposición de estrías y visibilidad de estas en campo. Cada medida está compuesta por los siguientes parámetros; el rumbo y buzamiento de cada plano de falla, el Pitch (ángulo que forma la dirección del desplazamiento) de la estría asociada al plano de falla y el sentido del desplazamiento del plano; estos parámetros son los necesarios para ingresar a la base de datos del software FaultKin y así poder hacer su respectivo análisis. En la mayor parte de los planos estudiados se usó principalmente el criterio “R” (Fig. 33) (Doblas, 1983), en lo que se refiere a fracturas secundarias (del tipo Riedel) y en segundo lugar al criterio de imbricación de recristalizaciones (Petit, 1987).

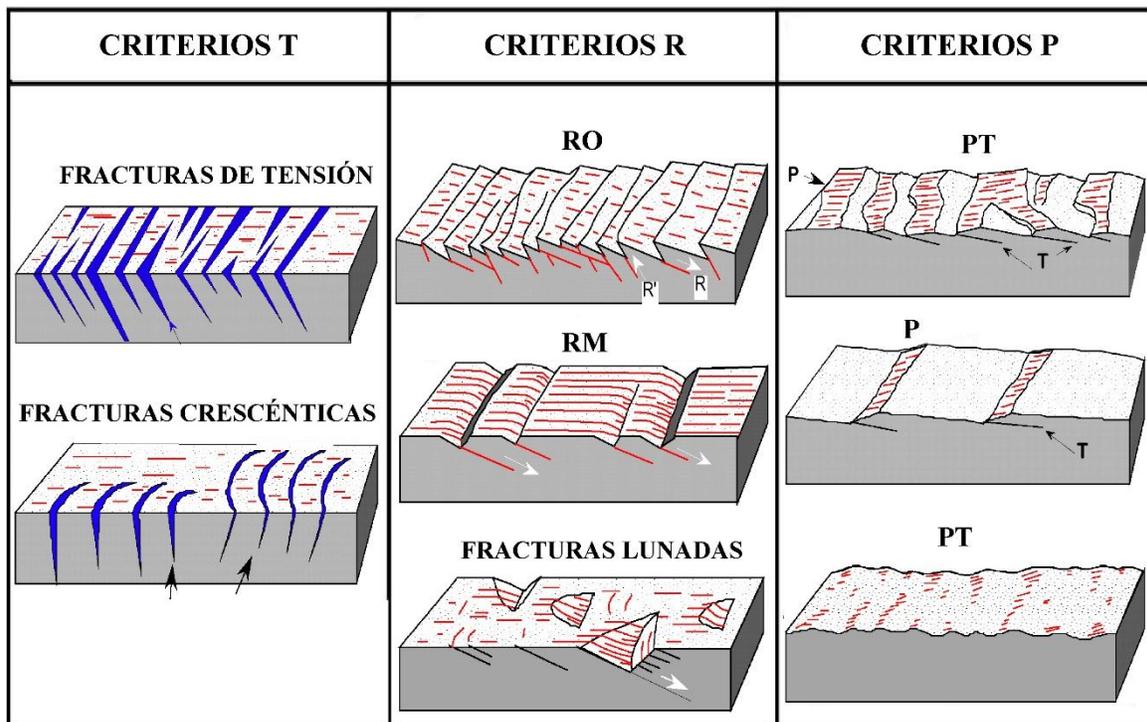


Figura 33: Criterios cinemáticos para determinar el movimientos de fallas (Petit, 1987).

Cabe resaltar que hay múltiples indicadores cinemáticos, los cuales nos ayudaran de manera práctica a reconocerlas y aplicarlas en campo (Fig. 34), esta clasificación en función de su geometría, forma y estructura (Doblas, 1998).

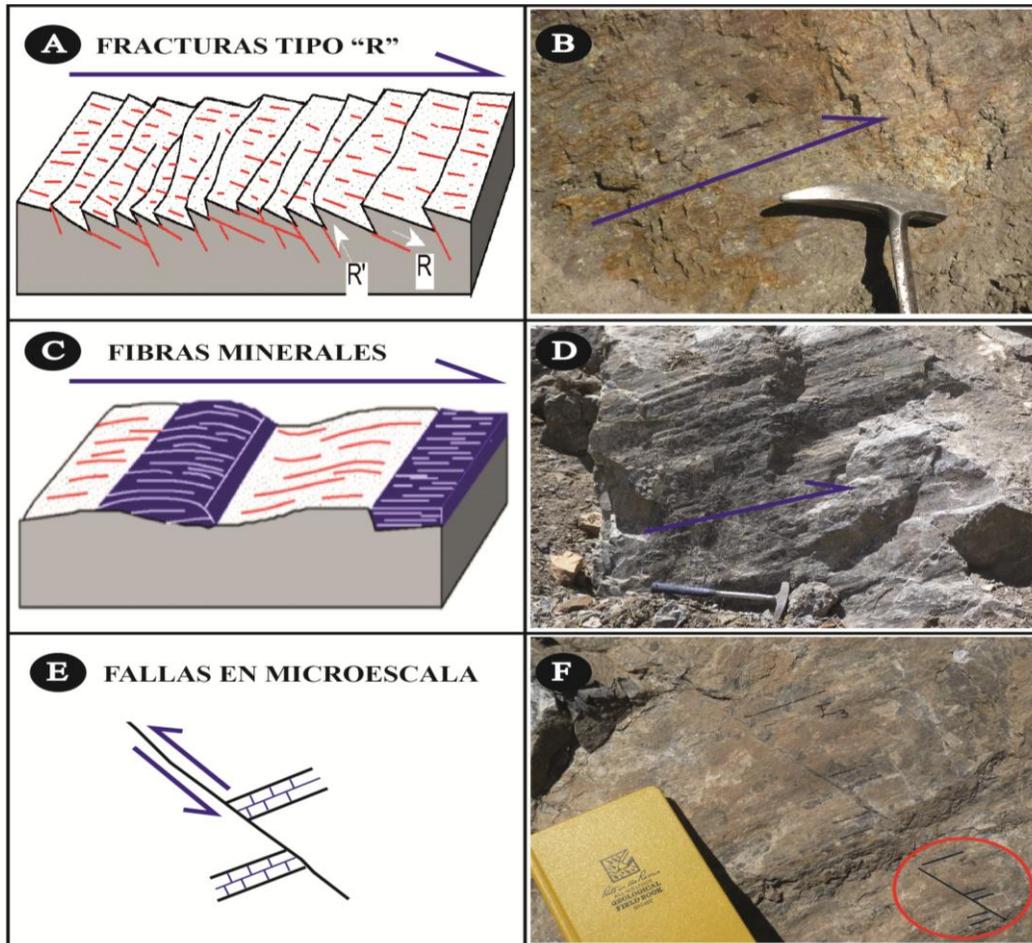


Figura 34: Criterios para la determinación de la cinemática en planos de falla. A) Criterio de “subir la escalera” connota las fracturas tipo Riedel. B) Riedel sintético (R) y antitético (R[^]) en un plano de falla. C) Criterio de “bajar la escalera” genera fibras minerales o Slickenfibers. D) Cristalización de calcita en un plano de falla en calizas. E) Falla sinistral en microescala. F) Capas de caliza que están desplazadas con un movimiento lateral izquierdo.

4.1.3. CRITERIOS DE CAMPO PARA RECONOCER INDICADORES CINEMÁTICOS

El análisis cinemático de fallas y su reconocimiento en el campo consiste en determinar el sentido del movimiento (inverso, normal o transcurrente, llámese dextral o sinistral) de fallas, a través de la interpretación de una variedad de pequeñas estructuras asociadas a las estrías en el plano de falla denominadas “Tectoglifos” (Fig. 35). Las fallas son muy importantes, debido a que son los cronómetros de la historia tectónica de un sistema

estructural, por ello es importante reconocer los diferentes modelos de fracturación y la cinemática de fallas, a fin de entender los estilos de deformación espacial y temporal.



Figura 35: Tectoglifos para definir el sentido de movimiento de una falla (Quispe, 2006).

4.2.DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Para la recolección de datos de cinemática de fallas que se encuentran impresas en rocas mesozoicas de la Cuenca Arequipa en Tacna, se han realizado una Estación Microtectónica (EM) para cada sistema de fallas, los datos han sido literalmente tamizados, dicho de otro modo, han pasado por un control de calidad, verificando su veracidad mediante la representación estereográfica y los resultados del análisis de cada población de fallas por el método de los diedros rectos (donde se encuentra la dispersión de los ejes en compresión y los ejes en extensión) están representados en los estereogramas que nos brinda el software FaultKin. Para cada Estación Microtectónica se ha considerado mostrar el afloramiento del cual se han obtenido los datos y esquematizar o representar las estructuras al costado derecho de cada imagen (con su respetivo esquema o ilustración), detallar la medida de los indicadores cinemáticos de cada estría, plotear todas las estrías de cada EM y analizar el promedio de éstas; incluyendo los parámetros estructurales de esfuerzos resultantes de cada promedio (Eje, Parámetro R, Dirección, Cabeceo, Posición de Anderson y Régimen), para la posición de Anderson abreviaremos como P. Anderson y para el parámetro R como P. R.

4.2.1. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°1: CHULPAPALCA

Ubicada al SO de la localidad de Chulpapalca aproximadamente a 1km de distancia (UTM: 402352E, 8034997N), cerca de la carretera Palca – Chulpapalca, donde afloran rocas volcánicas de la Formación Chocolate que está intruída por el Batolito Challaviento, el contacto entre ambas es una silicificación, lo cual ha sido generado por un proceso de fallamiento. Se muestran fallas en diferentes direcciones, en su mayoría de rumbo, con componente sinestral. Está conformada por 9 medidas de estrías de falla (Tabla 4) (Fig. 36). Luego se han procesado estos datos de estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando estadísticamente se obtuvo un promedio gráfico (Fig. 37) representativo de la EM-1, con los parámetros vectoriales (Tabla 5) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

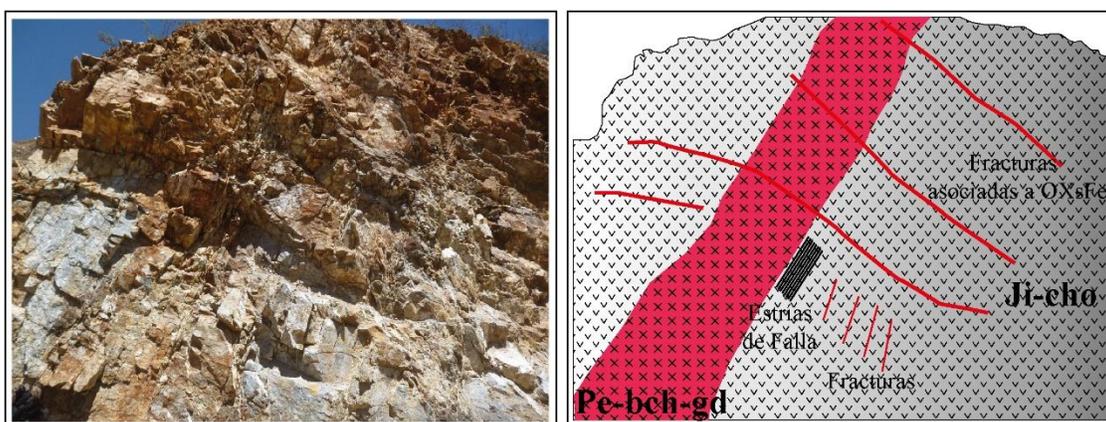


Figura 36: Lavas andesíticas de la Formación Chocolate silicificadas por la intrusión del Batolito Challaviento.

Tabla 4: Indicadores cinemáticos para la Estación Microtectónica Chulpapalca

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 162	68 SO	27 NO	S _x
E-2	N 191	87 NO	44 SO	D _x
E-3	N 158	51 SO	12 NO	D _x
E-4	N 335	77 NE	9 NO	S _x
E-5	N 320	74 NE	25 NO	S _x
E-6	N 124	76 SO	6 NO	D _x
E-7	N 180	68 O	34 S	D _x
E-8	N 315	86 NE	47 NE	I _x
E-9	N 98	73 S	12 SO	S _x

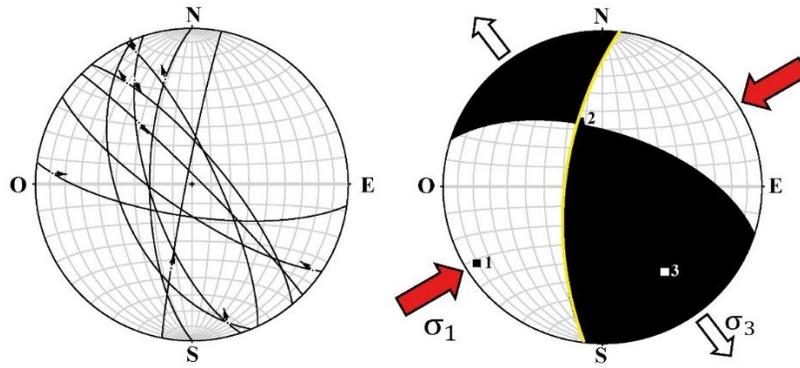


Figura 37: Ploteo de estrías de falla en la EM - 1

Tabla 5: Parámetros estructurales de la EM Chulpapalca.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.0757	238.8 °	6.9 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0414	338.5 °	54.3 °	VERTICAL	
σ_3	0.1171	144.0 °	34.8 °	HORIZONTAL	

4.2.2. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°2: JUNERATA

Se encuentra al este del Cerro Junerata y al oeste de la localidad de Copapuquio, aproximadamente a 1.2 km (UTM: 403706E, 8033232N). El afloramiento corresponde a calizas de la Formación Pelado que está afectado por la Falla Junerata, lo cual provoca que la Formación Pelado se sitúe encima del Grupo Yura. Ésta EM consta de tres medidas de estrías de falla (Tabla 6) (Fig. 38). Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio gráfico (Fig. 39) representativo de la EM-2, con los parámetros vectoriales (Tabla 7) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

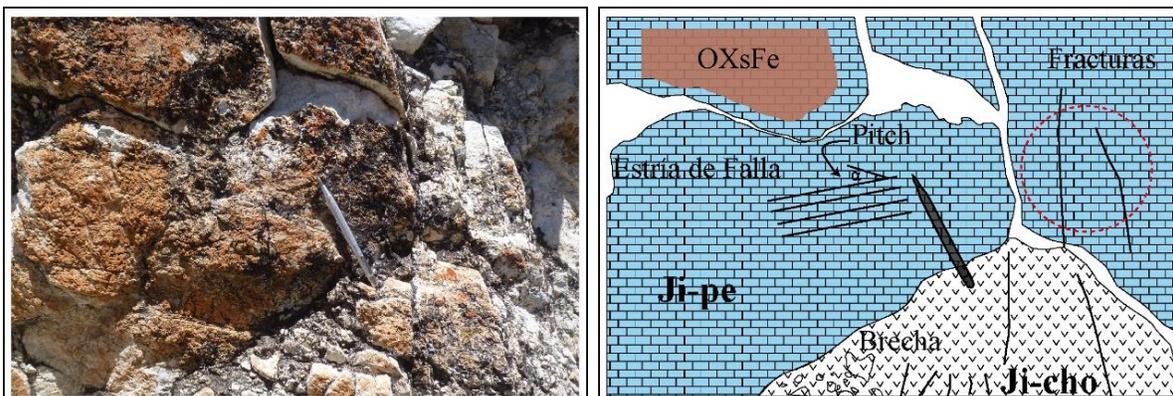


Figura 38: Calizas mudstone de la Formación Pelado afectadas por la Falla Junerata.

Tabla 6: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Junerata.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 124	48 SO	40 SE	S_X
E-2	N 114	51SO	54 SE	S_X
E-3	N 104	71 SO	24 SE	S_X

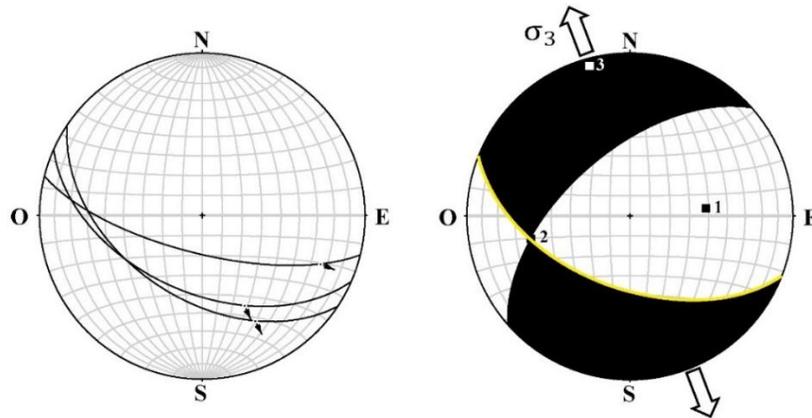


Figura 39: Ploteo de estrías de falla en la EM – 2.

Tabla 7: Parámetros estructurales de la EM Junerata.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4374	82.9 °	52.4 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0173	257.1 °	37.4 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4547	349.2 °	2.9 °	HORIZONTAL	

4.2.3. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°3: EL INGENIO

Se encuentra al noreste de la localidad de El Ingenio, aproximadamente a 0.7 km (UTM: 400936E, 8035794N). El afloramiento corresponde a lavas andesíticas de la Formación Chocolate que está afectado por la Falla Junerata. Además, esta EM se compone de 2 medidas de estrías de falla (Tabla 8) (Fig. 40). Luego se han procesado los datos de las 2 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 41) representativo de la EM-3, con los parámetros vectoriales (Tabla 9) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

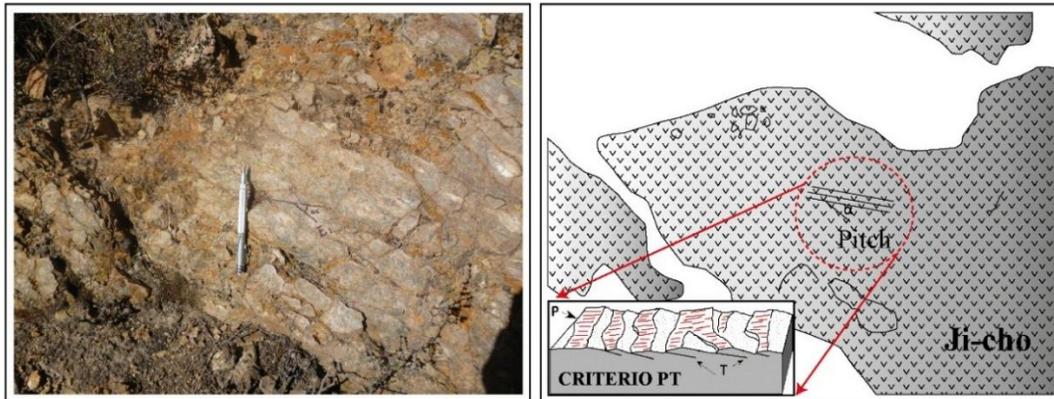


Figura 40: Rocas volcánicas andesíticas atribuibles a la Formación Chocolate afectadas por la cinemática de la Falla Junerata.

Tabla 8: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica El Ingenio.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 328	50 NE	51 NO	I _x
E-2	N 300	68 NE	24 NO	S _x

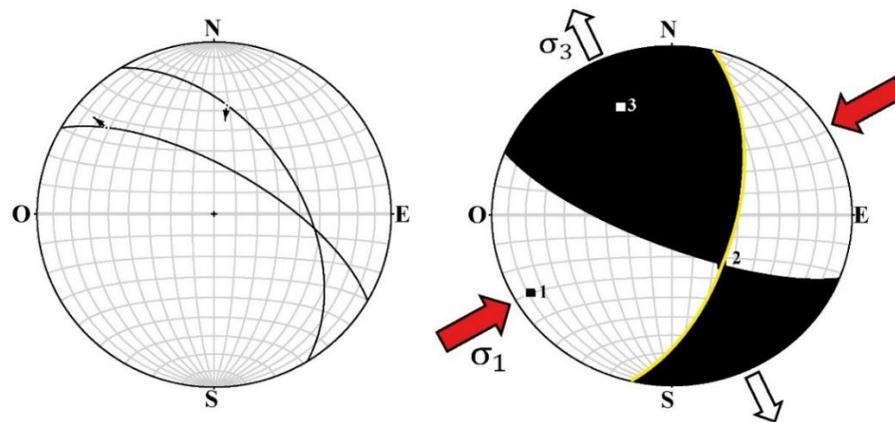


Figura 41: Ploteo de estrías de falla en la EM - 3.

Tabla 9: Parámetros estructurales de la EM El Ingenio.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3238	240.0 °	8.8 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0918	136.3 °	56.8 °	VERTICAL	
σ_3	0.2320	335.5 °	31.7 °	HORIZONTAL	

4.2.4. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°4: CAUSURI

Ubicada al noreste de la localidad de Causuri, aproximadamente a 1 km (UTM: 400488E, 8036252N), donde afloran tobas piroclásticas de la Formación Chocolate que están siendo afectadas por la Falla Junerata. Esta EM está compuesta por 6 medidas de estrías de falla. (Tabla 10) (Fig. 42). Posteriormente se han procesado los datos de las 6 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 43) representativo de la EM-4, con los parámetros vectoriales (Tabla 11) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

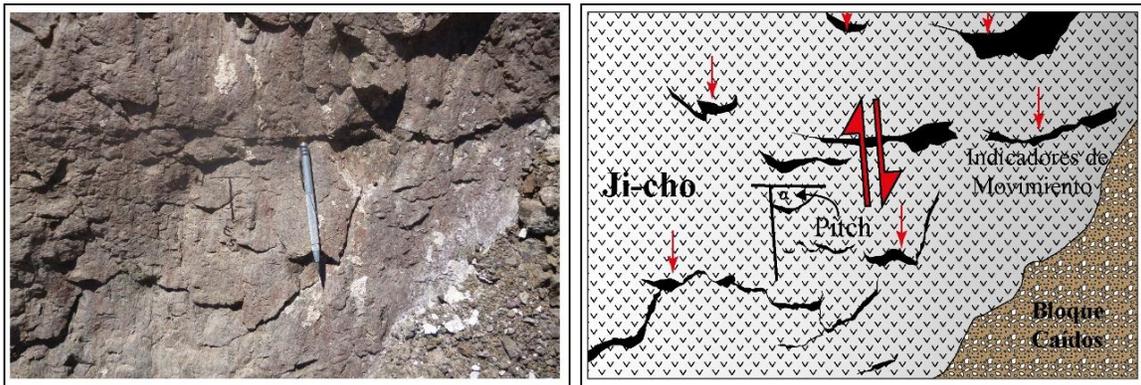


Figura 42: Estrías de falla en andesitas porfídicas de la Formación Chocolate en Causuri.

Tabla 10: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Causuri.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 163	33 O	70 NO	I _x
E-2	N 166	50 O	80 NO	I _x
E-3	N 120	61 SO	43 NO	S _x
E-4	N 171	53 O	54 NO	I _x S _x
E-5	N 223	73 NO	18 SE	D _x
E-6	N 72	71 SE	45 SO	I _x

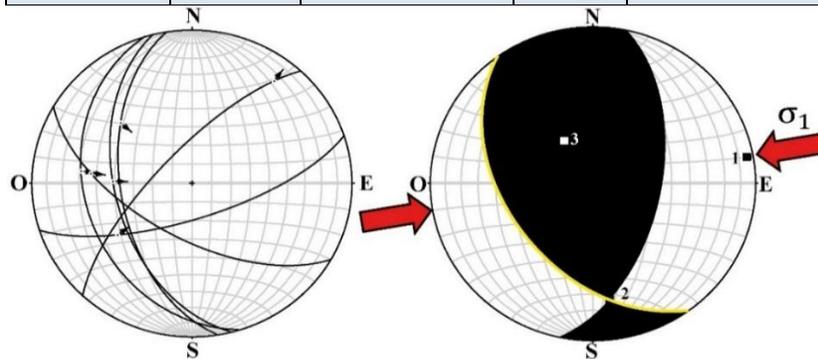


Figura 43: Ploteo de estrías de falla en la EM – 4.

Tabla 11: Parámetros estructurales de la EM Causuri.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3510	79.8 °	5.5 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0140	172.5 °	25.7 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.3651	338.6 °	63.6 °	VERTICAL	

4.2.5. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 5: ATASPACA – SECTOR OESTE

Se encuentra ubicada al oeste de poblado de Ataspaca (UTM: 400704E, 8039224N), aproximadamente a 2 km de distancia. Afloran rocas intrusivas de composición tonalítica, con cristales de plagioclasas y hornblendas, se observa fracturas rellenas de óxidos de hierro. Esta estación está compuesta por 3 medidas de estrías de falla. (Tabla 12) (Fig. 44). Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), y se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 45) representativo de la EM-5, con sus parámetros vectoriales (Tabla 13) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

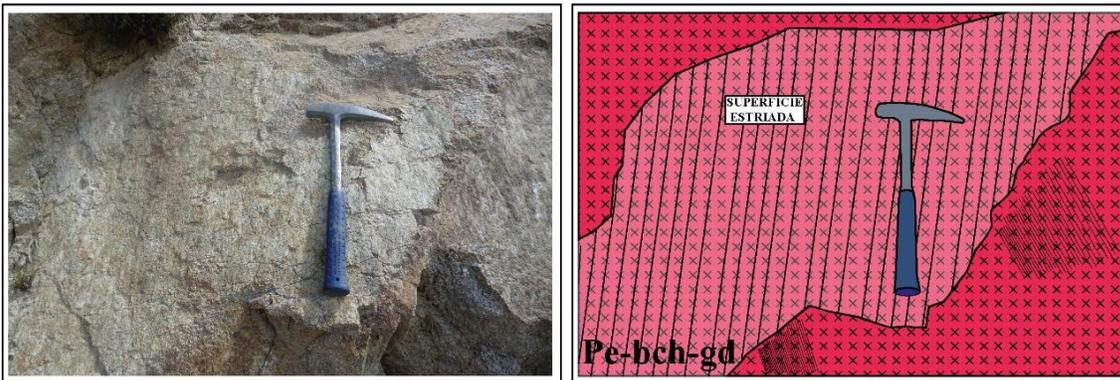


Figura 44: Slickensides en tonalitas del Batolito Challaviento en Ataspaca.

Tabla 12: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ataspaca – Sector Oeste.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 313	50 NE	77 SE	I _x
E-2	N 294	55 NE	87 SE	I _x
E-3	N 289	58 NE	69 SE	I _x

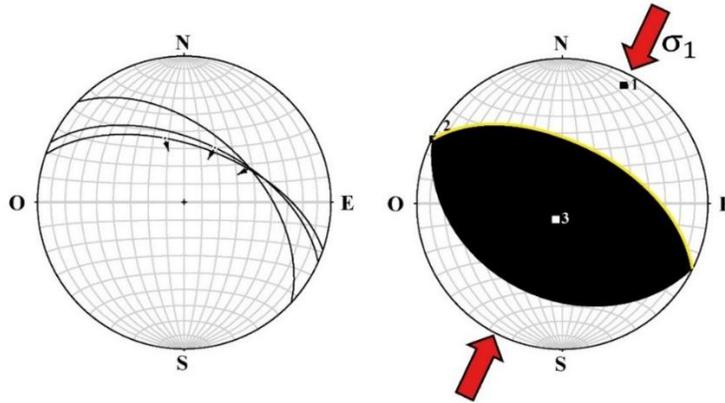


Figura 45: Ploteo de estrías de falla en la EM – 5.

Tabla 13: Parámetros estructurales de la EM Ataspaca - Sector Oeste.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4418	26.6 °	10.2 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0437	296.6 °	0.01 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4855	206.3 °	79.8 °	VERTICAL	

4.2.6. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°6: ATASPACA – SECTOR SUROESTE

Está ubicada al suroeste del poblado de Ataspaca (UTM: 400945E, 8037398N) aproximadamente a 3 km. El afloramiento corresponde a andesitas de color gris verdoso de textura afanítica con cristales de plagioclasas, además de poseer un sistema de fracturas subverticales. Estas rocas están afectadas por la Falla Caplina que provoca un movimiento lateral izquierdo (sinestral). Esta EM consta de 3 medidas (Tabla 14) (Fig. 46).

Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 47) representativo de la EM-6, con sus parámetros vectoriales (Tabla 15).

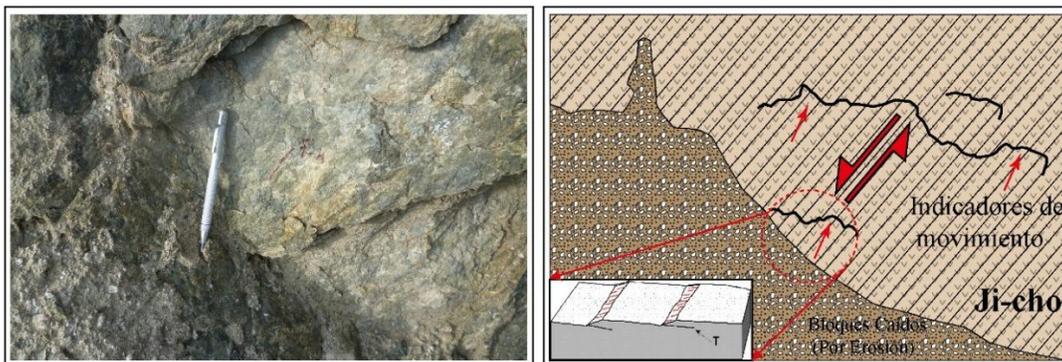


Figura 46: Estrías de falla en andesitas afaníticas de la Formación Chocolate en Ataspaca.

Tabla 14: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ataspaca – Sector Suroeste.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 151	66 SO	51 NO	N_X
E-2	N 106	81 SO	82 NO	N_X
E-3	N 126	78 SO	70 NO	N_X

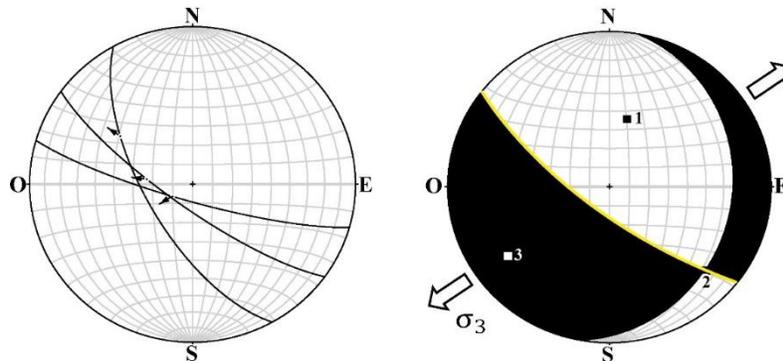


Figura 47: Ploteo de estrías de falla en la EM – 6.

Tabla 15: Parámetros estructurales de la EM Ataspaca - Sector Suroeste.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4991	12.0 °	52.9 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0907	132.9	21.2 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4084	235.2	28.8 °	HORIZONTAL	

4.2.7. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°7: HUACANO CHICO – SECTOR N

Se encuentra ubicada a Norte de la localidad de Huacano Chico (UTM: 387692E, 8053488N) a una distancia aproximada de 3.6 km. El afloramiento está constituido de Milonitas que presentan silicificación, además se evidencia craquelamiento. Esta EM está conformada por 3 medidas de estrías de falla (Tabla 16) (Fig. 48). Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 49) representativo de la EM-7, con sus parámetros vectoriales (Tabla 17) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

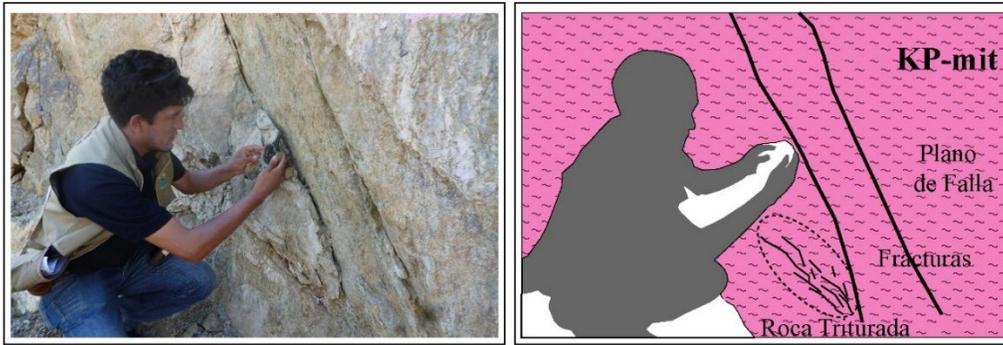


Figura 48: Estrías de falla en Milonitas, sector Huacano - Carretera a Tarata.

Tabla 16: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Chico – Sector norte.

Nº ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 187	81 NO	61 SO	I _x S _x
E-2	N 198	76 NO	61 SO	I _x S _x
E-3	N 205	65 NO	68 SO	I _x S _x

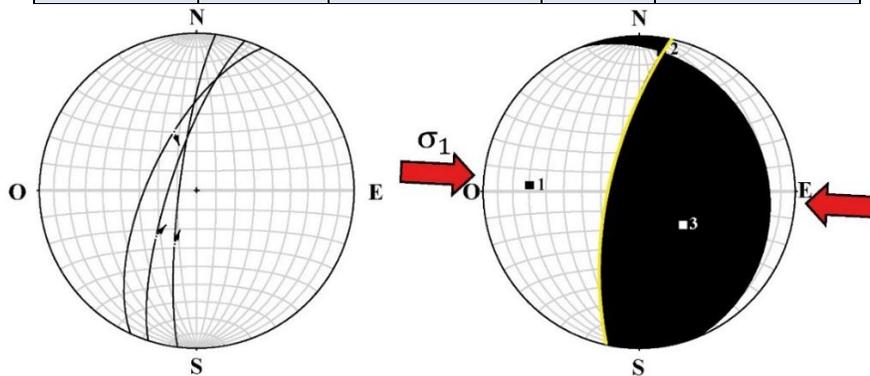


Figura 49: Ploteo de estrías de falla de la EM - 7.

Tabla 17: Parámetros estructurales de la EM Huacano Chico – Sector norte.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4191	273.5 °	28.9 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0313	9.2 °	10.3 °	VERTICAL	
σ_3	0.4503	116.8 °	59.0 °	HORIZONTAL	

4.2.8. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N°8: HUACANO CHICO – SECTOR NE

Ubicada al NE de la localidad de Huacano Chico (UTM: 387455E, 8052396N) aproximadamente a 3.5 km. En el afloramiento se observa rocas de textura gneissítica, contiene blastos orientados de cuarzo, estas rocas pertenecen al Complejo Basal de la Costa que se encuentra en contacto con el Batolito Challaviento. Conformada por 6 medidas de estrías de falla. (Tabla 18) (Fig. 50). Luego se han procesado los datos de las 6 estrías

trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 51) de la EM-8, con parámetros vectoriales (Tabla 19) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

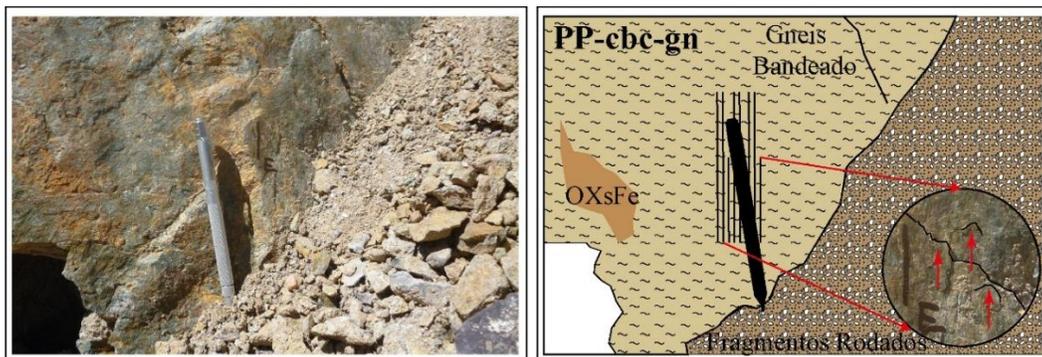


Figura 50: Estrías de falla en rocas gneissíticas del Complejo Basal de la Costa.

Tabla 18: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Chico – Sector NE

Nº ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 183	60 O	85 S	N _x
E-2	N 165	52 SO	80 S	I _x
E-3	N 139	66 SO	64 S	I _x
E-4	N 145	54 SO	85 S	I _x
E-5	N 100	49 S	41 SE	D _x
E-6	N 132	55 SO	88 S	N _x

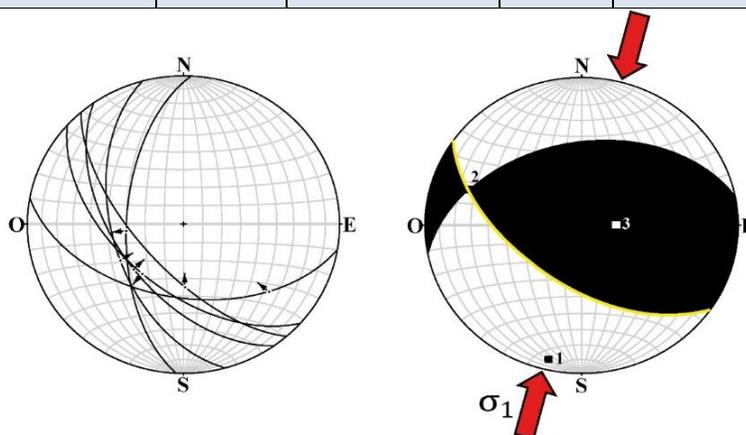


Figura 51: Ploteo de estrías de falla de la EM-8.

Tabla 19: Parámetros estructurales de la EM Huacano Chico – Sector noreste.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.1315	194.2 °	7.5 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0225	287.7 °	2.7 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.1539	88.5 °	64.0 °	VERTICAL	

4.2.9. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N°9: QUEBRADA TOCUCO SECTOR SE

Ubicada al SE de la localidad de Tocado (UTM: 383127E, 8026055N) a una distancia aproximada de 1.6 km. El afloramiento está constituido por rocas de tonalidad rojiza, de textura granular, con una granulometría media y cubierto por patinas de OXsFe. Conformada por 3 medidas de estrías de falla. (Tabla 20) (Fig. 52). Posteriormente se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 53) representativo de la EM-9, con sus parámetros vectoriales (Tabla 21) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

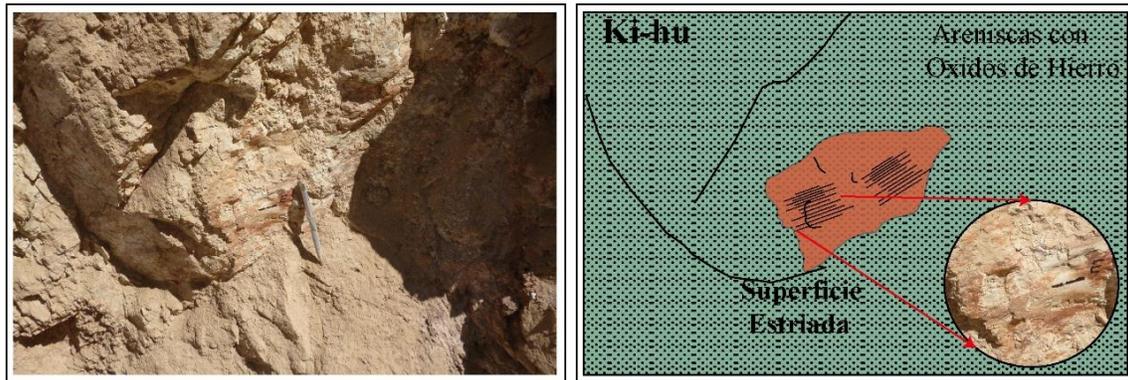


Figura 52: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.

Tabla 20: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocado Sector SE

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 85	87 S	86 NE	N _X
E-2	N 207	85 NO	10 NE	D _X
E-3	N 198	87 NO	12 SO	D _X

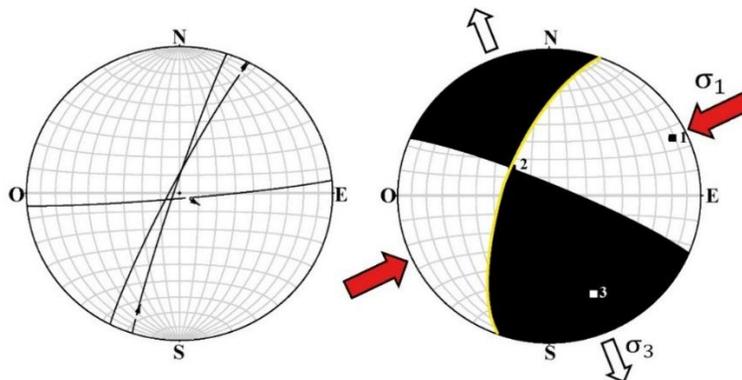


Figura 53: Ploteo de estrías de falla de la EM-9.

Tabla 21: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco – Sector Sureste.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3405	63.9 °	12.2 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0757	306.8 °	64.5 °	VERTICAL	
σ_3	0.4162	158.9 °	22.0 °	HORIZONTAL	

4.2.10. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 10: CHUSCHUCO – SECTOR ESTE

Esta se encuentra ubicada al oeste de la localidad de Chuschuco (UTM: 382662E, 8026238N) aproximadamente a una distancia de 1 km. El afloramiento está conformado por areniscas de grano medio a grueso de color rojizo, con estratificación definida. Se observan fallas normales en su mayoría. Ésta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 22) (Fig. 54). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 55) representativo de la EM-10, con sus parámetros vectoriales (Tabla 23) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

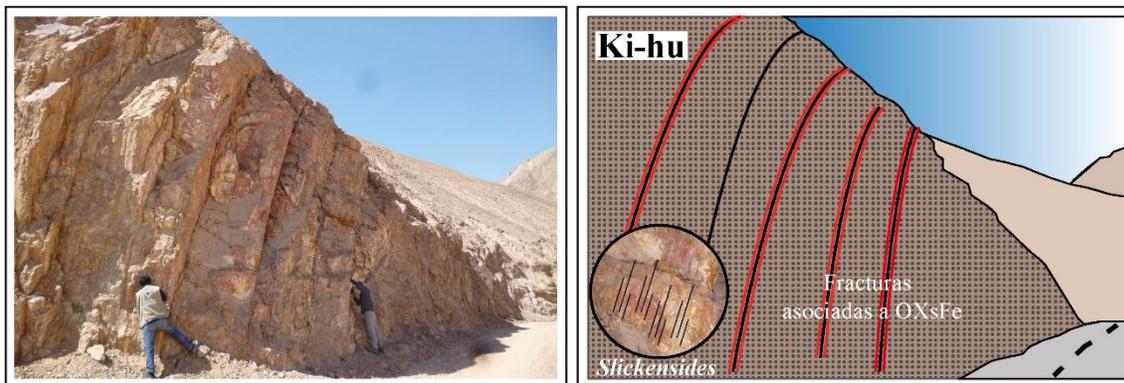


Figura 54: Estrías de falla paralelas a la estratificación en areniscas de la Fm. Hualhuani.

Tabla 22: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chuschuco - Sector Este.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 74	80 SE	65 NE	N _x
E-2	N 40	84 SE	80 NE	N _x
E-3	N 344	74 NE	86 NE	N _x
E-4	N 315	60 NE	61 NO	I _x
E-5	N 340	72 NE	69 NO	N _x

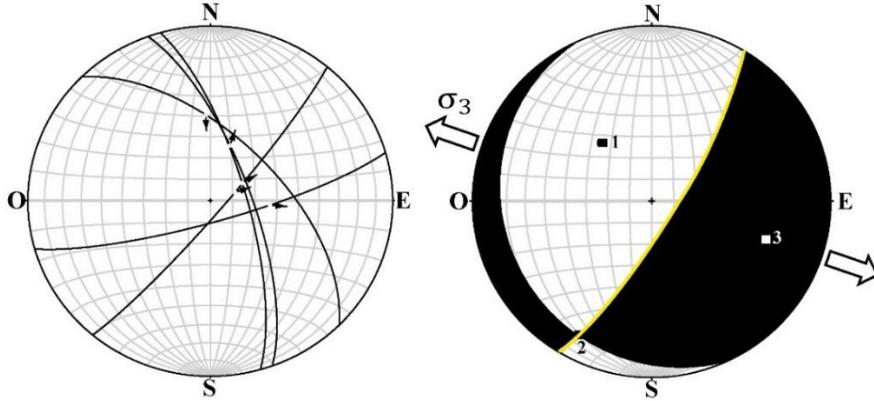


Figura 55: Ploteo de estrías de falla de la EM-10.

Tabla 23: Parámetros estructurales de la EM Chuschuco - Sector Este.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2482	318.7°	53.6°	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0234	208.4°	14.3°	HORIZONTAL	
σ_3	0.2716	108.9°	32.6°	HORIZONTAL	

4.2.11. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N°11: QUEBRADA TOCUCO – SECTOR CENTRAL

Ubicada en la Quebrada Tocuco (UTM: 382638E, 8026477N) a una distancia aproximada de 1 km. El afloramiento está compuesto por rocas de color blanquecino de grano fino a medio, que, superficialmente presentan tonalidades rojizas debido a la acción de los agentes oxidantes. Conformada por 2 medidas de estrías de falla (Tabla 24) (Fig. 56). Posteriormente se han procesado los datos de las 2 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 57) de la EM-11, con sus parámetros vectoriales (Tabla 25) y espaciales de esfuerzos deformadores.

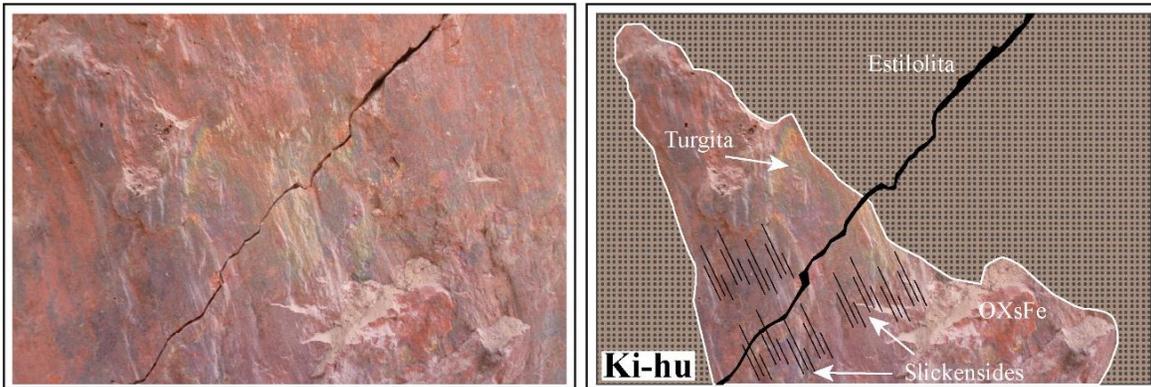


Figura 56: Estrías de falla en areniscas de la Formación Hualhuani.

Tabla 24: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco - Sector Central.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 290	34 NE	77 E	I _x
E-2	N 80	86 S	87 E	N _x

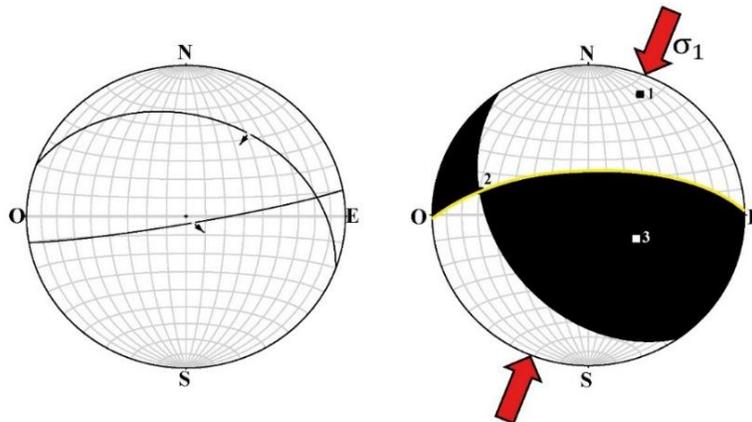


Figura 57: Ploteo de estrías de falla de la EM-11.

Tabla 25: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco - Sector central.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2460	21.5 °	15.2 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0821	282.8 °	29.2 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.3281	135.6 °	56.4 °	VERTICAL	

4.2.12. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 12: CHUSCHUCO – SECTOR NE

Se encuentra ubicada al noreste de la localidad de Chuschuco (UTM: 382200E, 8026407N) aproximadamente a 0.6 km de distancia desde Chuschuco. El afloramiento está compuesto de areniscas de color rojizo, con estratificación subvertical, afectada por dos fallas de alto ángulo. Esta EM está conformada por 2 medidas de estrías de falla (Tabla 26) (Fig. 58).

Luego se han procesado los datos de las 2 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 59) representativo de la EM-12, con sus parámetros vectoriales (Tabla 27) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

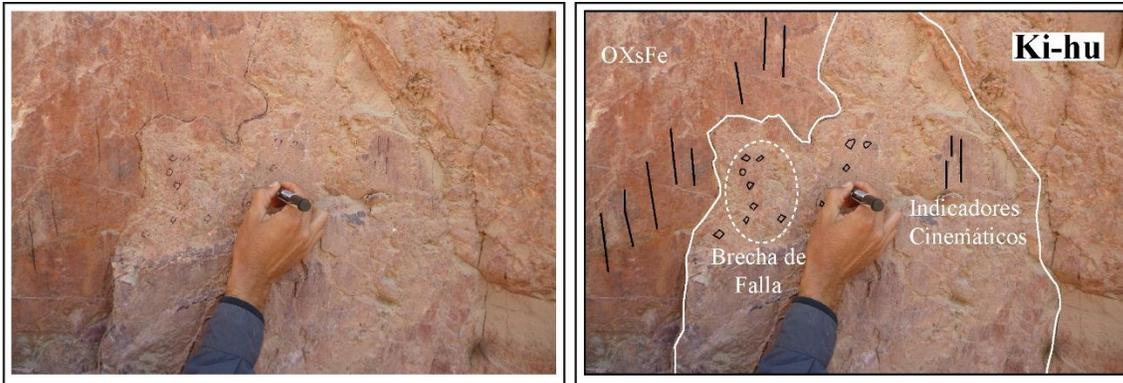


Figura 58: Falla subvertical en areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani.

Tabla 26: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chuscuco – Sector Noreste.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 245	56 NO	84 O	N _x
E-2	N 355	78 E	87 N	I _x

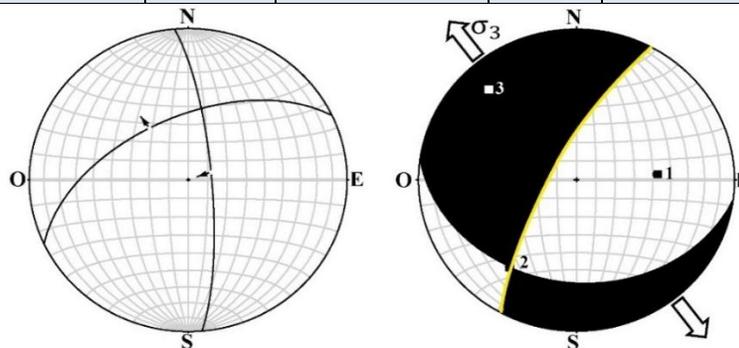


Figura 59: Ploteo de estrías de falla en la EM-12.

Tabla 27: Parámetros Estructurales de la EM Chuscuco - Sector noreste.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3434	85.7 °	49.1 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0300	215.8 °	29.2 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.3134	321.6 °	25.9 °	HORIZONTAL	

4.2.13. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 13: CHAÑAL

Se ubica en la Quebrada Chañal (UTM: 387058E, 8034734N) a una distancia aproximada de 2 km desde la Quebrada Chañal. El afloramiento está constituido por lavas andesíticas de la Formación Samanape, que sobryace a la Formación Chocolate y es intruida por el

Batolito Yarabamba. Ésta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 28) (Fig. 60). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 61) representativo de la EM-13, con sus parámetros vectoriales (Tabla 29) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

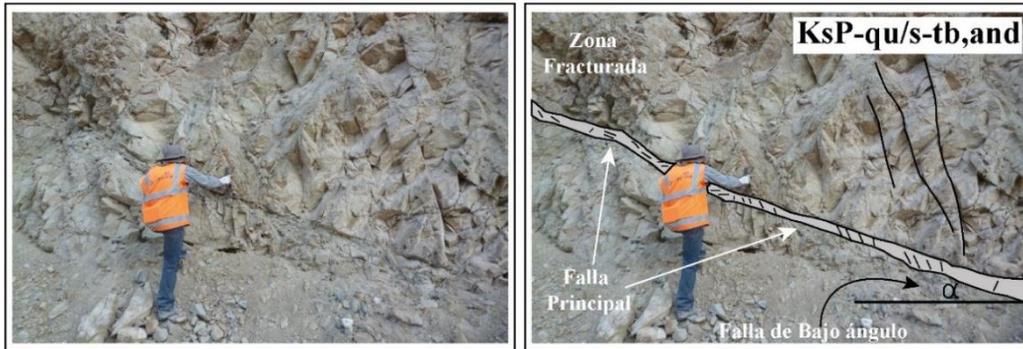


Figura 60: Estrías en la falla de bajo ángulo, afectando a rocas de la Unidad Samanape, Chañal.

Tabla 28: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Chañal.

Nº ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 24	65 SE	19 NE	D _x
E-2	N 30	45 SE	8 N	D _x
E-3	N 28	78 SE	12 NE	D _x
E-4	N 40	82 SE	40 NE	D _x

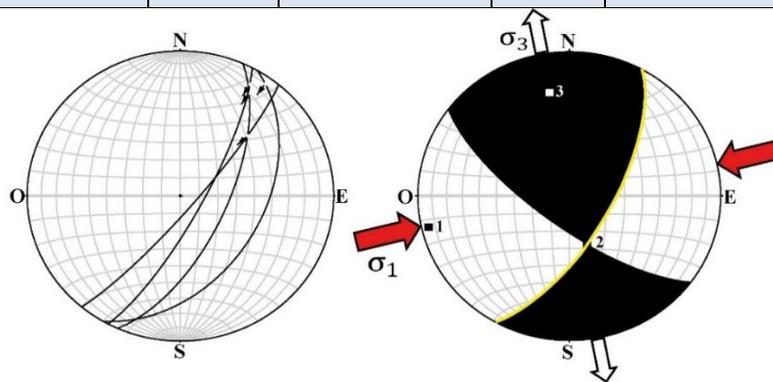


Figura 61: Ploteo de estrías de falla de la EM-13.

Tabla 29: Parámetros Estructurales de la EM Chañal.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4450	257.0 °	3.5 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0417	160.8 °	60.7 °	VERTICAL	
σ_3	0.4867	348.9 °	29.0 °	HORIZONTAL	

4.2.14. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 14: COPAPUQUIO

Se ubica a 200 metros en dirección Oeste de la localidad de Copapuquio (UTM: 404778E, 8033225N). El afloramiento está compuesto por areniscas de color gris con una textura fina y superficialmente cubierta por OXsFe, esta unidad corresponde a la Formación Puente. Conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 30) (Fig. 62). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 63) representativo de la EM-14, con sus parámetros vectoriales (Tabla 31) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

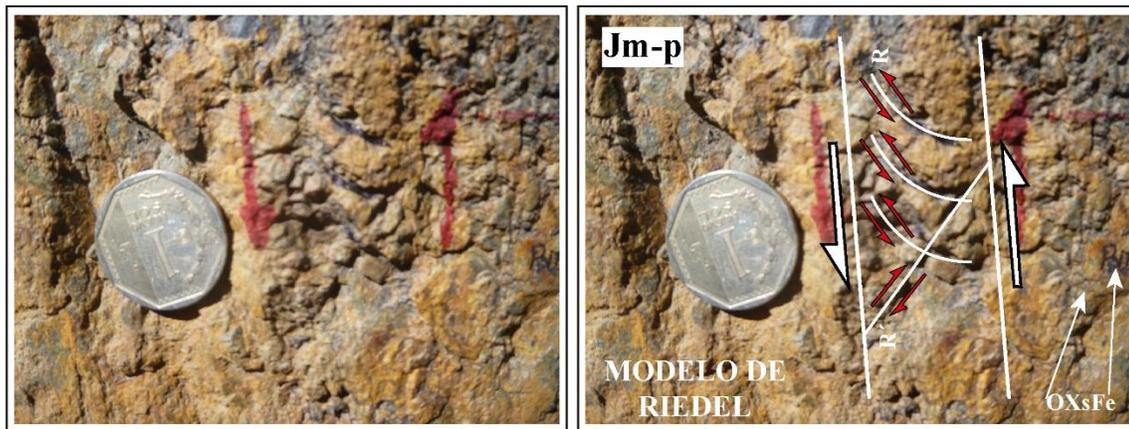


Figura 62: Sistema Riedel en areniscas de la Formación Puente en Copapuquio.

Tabla 30: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Copapuquio.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 170	58 SO	78 S	I _x
E-2	N 161	48 SO	76 S	I _x
E-3	N 175	56 SO	83 S	I _x
E-4	N 183	55 O	74 S	I _x

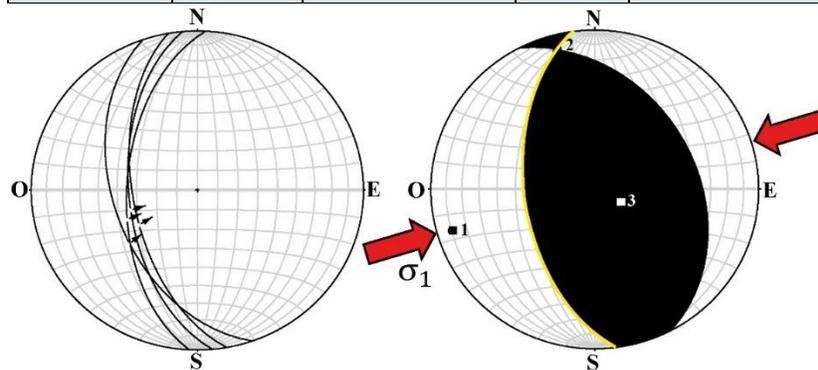


Figura 63: Ploteo de estrías de falla en la EM-14.

Tabla 31: Parámetros Estructurales de la EM Copapuquio.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4865	253.6 °	8.5 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0097	345.2 °	10.3 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4962	124.8 °	76.6 °	VERTICAL	

4.2.15. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 15: HUANUNE

Está ubicada al este de la localidad de Huanune (aproximadamente a 0.5 km) y a 1 km en dirección suroeste del poblado de Palca (UTM: 397813E, 8033302N). El afloramiento está constituido de calizas de color gris azulado en estratos de 30 cm de potencia, intercalado con lutitas grises, estas rocas están afectados por una falla inversa que pertenece al sistema de la Falla Palca. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 32) (Fig. 64). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 65) representativo de la EM-15, con sus parámetros vectoriales (Tabla 33) y espaciales de los esfuerzos deformadores.



Figura 64: Estrías de falla en calizas de la Formación Socosani.

Tabla 32: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huanune.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 298	45 NE	54 SE	I _x
E-2	N 310	42 NE	65 SE	I _x
E-3	N 312	43 NE	48 SE	I _x
E-4	N 316	40 NE	51 SE	I _x

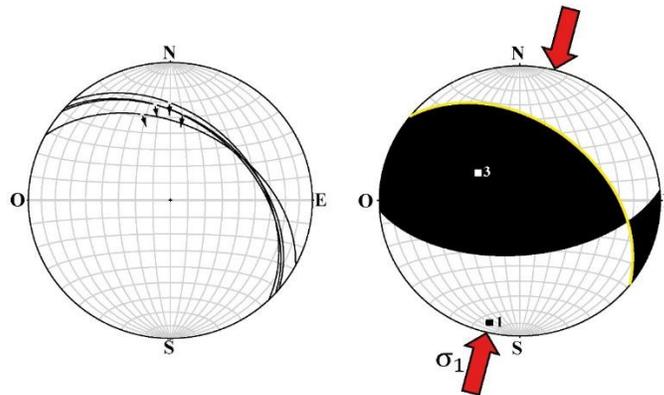


Figura 65: Ploteo de estrías de falla de la EM-15.

Tabla 33: Figura 52: Parámetros Estructurales de la EM Huanune.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4888	194.5 °	7.7 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0031	101.3 °	22.5 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4919	302.1 °	66.1 °	VERTICAL	

4.2.16. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 16: MEDIAFLOR

Se encuentra ubicada al sureste del Cerro Mediaflor (UTM: 401101E, 8027209N) aproximadamente a 0.6 km. El afloramiento está constituido por rocas andesíticas de color verde oscuro con hornblendas que se están alterando y óxidos de hierro en las fracturas. Esta EM está conformada por 5 medidas de estrías de falla. (Tabla 34) (Fig. 66).

Luego se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 67) representativo de la EM-16, con sus parámetros vectoriales (Tabla 35).

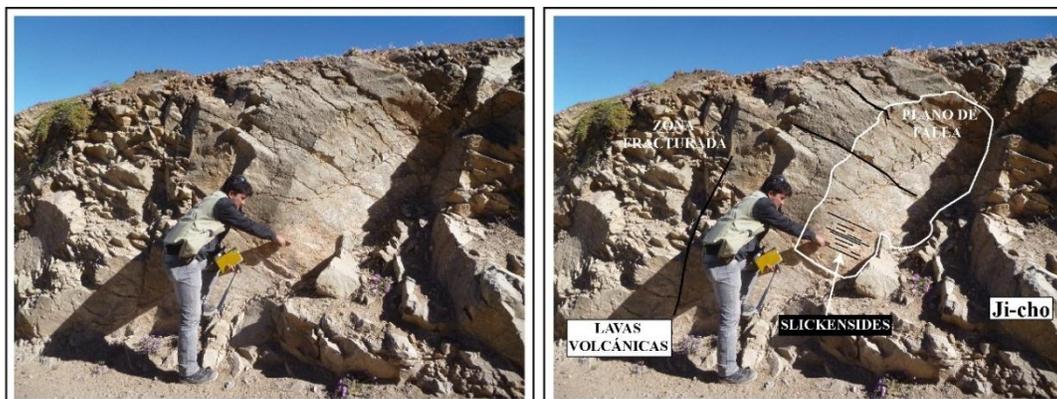


Figura 66: Estrías de falla en lavas andesíticas de la Formación Chocolate.

Tabla 34: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mediaflor.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 9	42 E	84 NE	I _X
E-2	N 360	50 E	70 N	I _X
E-3	N 15	88 SE	30 NE	D _X
E-4	N 24	89 SE	35 NE	D _X
E-5	N 25	87 SE	14 NE	D _X

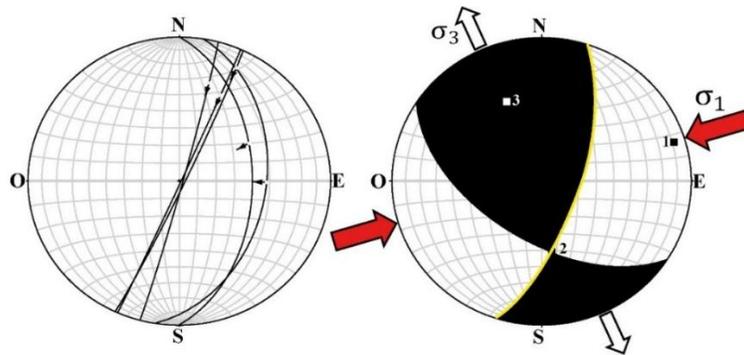


Figura 67: Ploteo de estrías de falla de la EM-16.

Tabla 35: Parámetros Estructurales de la EM Mediaflor.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4584	73.0 °	8.1 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.1111	172.2 °	48.3 °	VERTICAL	
σ_3	0.3473	336.0 °	40.5 °	HORIZONTAL	

4.2.17. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 17: CONDORINE

Ubicada al noreste de Palca (UTM: 399180E, 8035967N) aproximadamente a 2 km de Palca. Este afloramiento está constituido por lavas de textura afanítica de color violáceo de la Formación Chocolate, se encuentra afectado por fallas relacionadas a la Falla Palca. Ésta EM está conformada por 5 medidas de estrías de falla (Tabla 36) (Fig. 68). Luego se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 69) de la EM-17, con sus parámetros vectoriales (Tabla 37) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

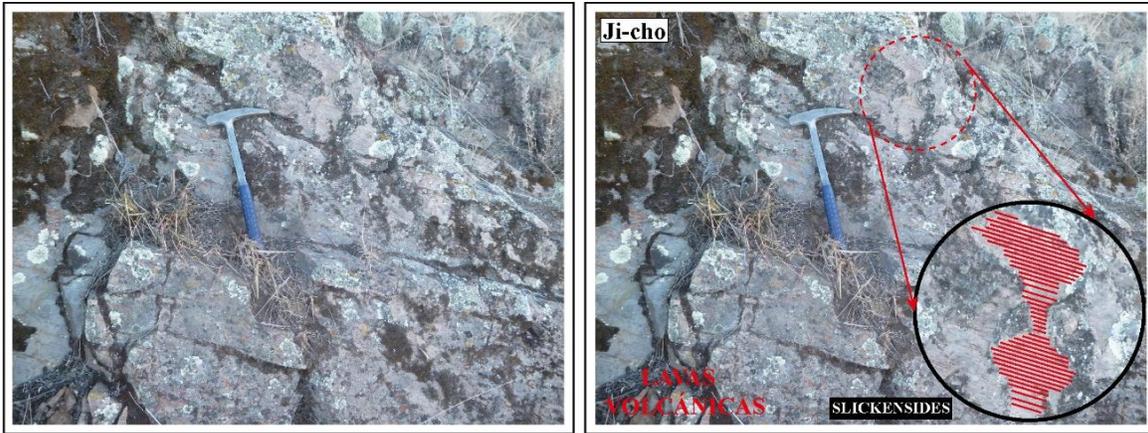


Figura 68: Estrías de falla en andesitas afaníticas de la Formación Chocolate.

Tabla 36: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Condorine.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 140	60 SO	28 SE	D _x
E-2	N 132	64 SO	29 SE	D _x
E-3	N 125	65 SO	29 SE	D _x
E-4	N 120	52 SO	44 SE	D _x
E-5	N 125	68 SO	40 SE	D _x

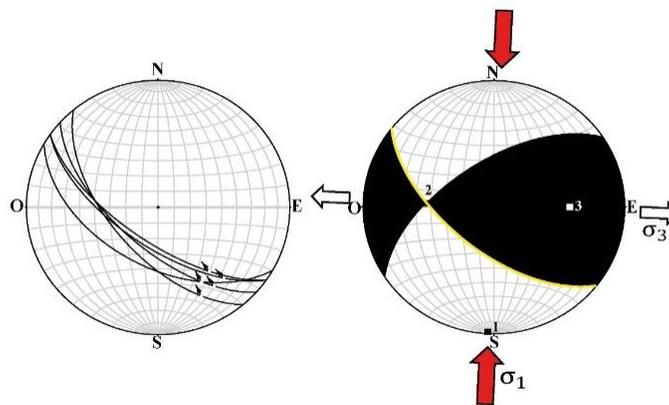


Figura 69: Ploteo de estrías de falla de la EM-17.

Tabla 37: Parámetros Estructurales de la EM Condorine.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4886	182.6 °	0.6 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0040	273.2 °	46.9 °	VERTICAL	
σ_3	0.4845	92.1 °	43.1 °	HORIZONTAL	

4.2.18. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 18: YANGANE

Está ubicada en la Quebrada Yangane (UTM: 403320E, 8031271N), aproximadamente a 2.2 km en dirección sureste del Cerro Junerata. El afloramiento está constituido por andesitas de color violáceo, de textura porfídica con cristales de plagioclasas que muestran leve alteración. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 38) (Fig. 70). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 71) representativo de la EM-18, con sus parámetros vectoriales (Tabla 39) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

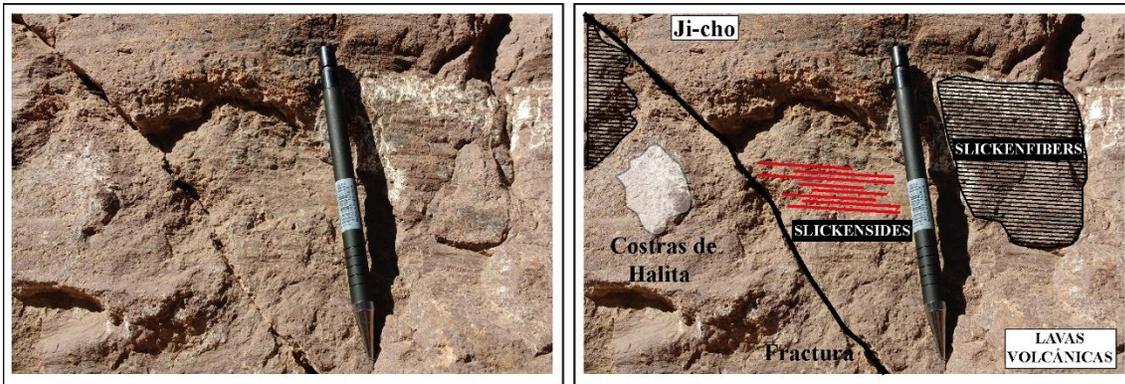


Figura 70: Estrías de falla es andesitas porfídicas de la Formación Chocolate.

Tabla 38: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Yangane.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 240	79 NO	5 SO	D _X
E-2	N 246	76 NO	3 SO	D _X
E-3	N 247	86 NO	15 SO	D _X
E-4	N 246	77 NO	12 SO	D _X

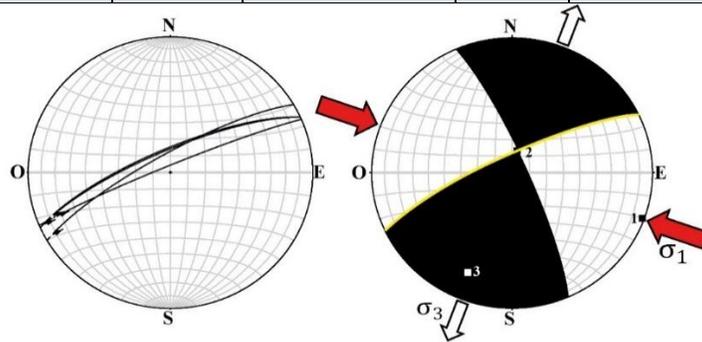


Figura 71: Ploteo de estrías de falla de la EM- 18.

Tabla 39: Parámetros Estructurales de la EM Yangane.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4925	110.3 °	1.4 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0046	14.5 °	76.3 °	VERTICAL	
σ_3	0.4970	200.6 °	13.6 °	HORIZONTAL	

4.2.19. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 19: CHALLAVIENTO

Está ubicada a 250 metros del poblado de Challaviento (UTM: 399757E, 8048306N). Este afloramiento está conformado por rocas intrusivas de color blanquecino, de textura fanerítica, con fenocristales de cuarzo, plagioclasas y hornblendas. Está conformado por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 40) (Fig. 72). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 73) representativo de la EM-19, con sus parámetros vectoriales (Tabla 41) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

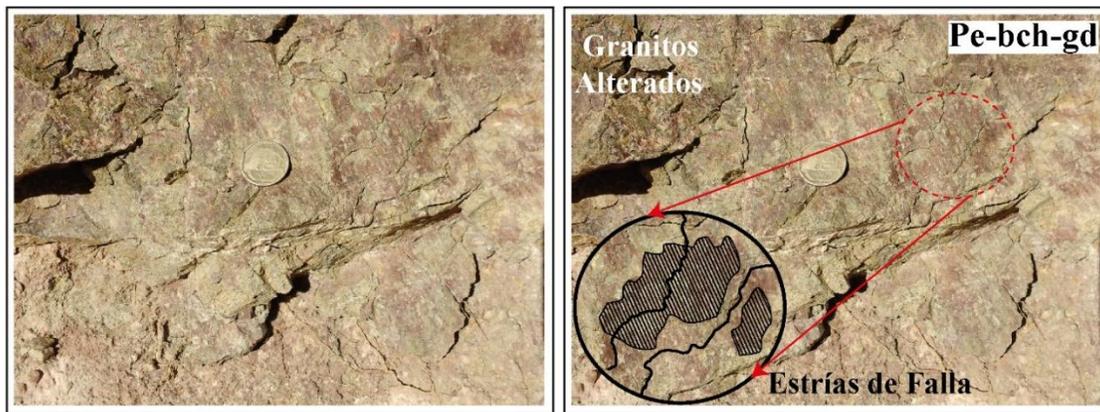


Figura 72: Estrías de falla afectando rocas granodioríticas del Batolito Challaviento.

Tabla 40: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Challaviento.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 188	63 NO	84 SO	N_x
E-2	N 178	75 O	78 SO	N_x
E-3	N 189	62 NO	81 SO	N_x
E-4	N 187	64 NO	82 SO	N_x

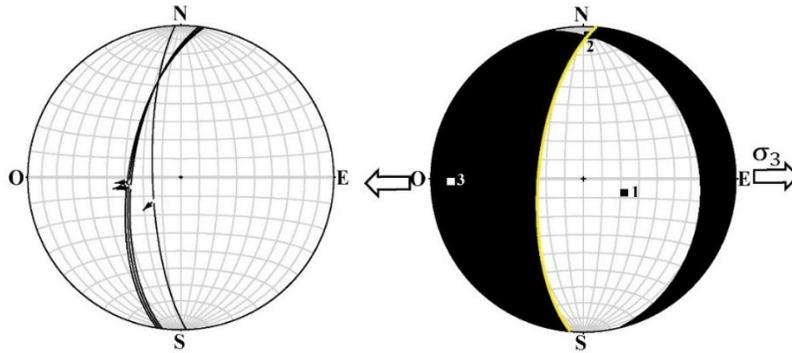


Figura 73: Ploteo de estrías correspondientes a la EM-19.

Tabla 41: Parámetros Estructurales de la EM Challaviento.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4897	110.0 °	68.1 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0033	1.8 °	7.1 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4864	269.1 °	20.6 °	HORIZONTAL	

4.2.20. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 20: ANCONSONTINE

Se encuentra al suroeste del Cerro Anconsontine (UTM: 389218E, 8048539N), aproximadamente a una distancia de 3 km en dirección sureste de la localidad de Huacano Chico. Este afloramiento es constituido por rocas brechadas de tonalidad rosada, de textura afanítica perteneciente al Batolito Challaviento. Ésta EM está conformada por 3 medidas de estrías de falla (Tabla 42) (Fig. 74). Posteriormente se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 75) representativo de la EM-20, con sus parámetros vectoriales (Tabla 43) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

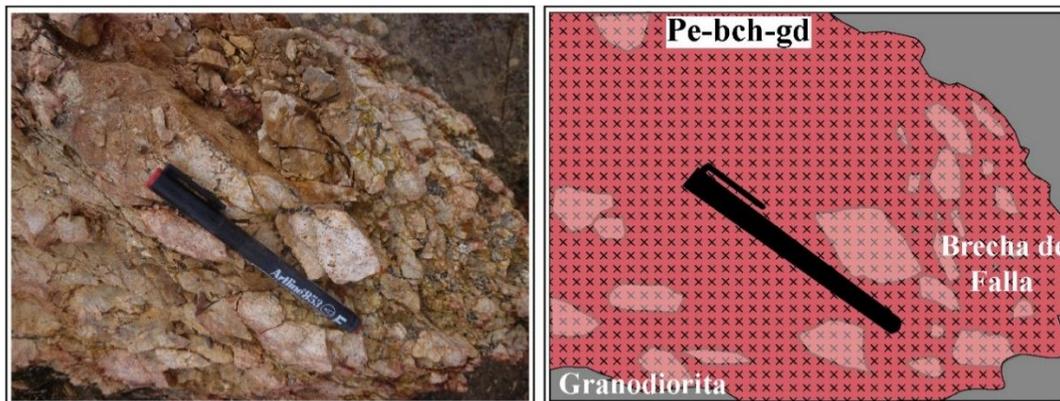


Figura 74: Estrías de falla en granitos del Batolito Challaviento.

Tabla 42: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Ancosontine.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 148	70 SO	19 NO	S_x
E-2	N 149	63 SO	9 NO	S_x
E-3	N 137	57 SO	11 NO	S_x

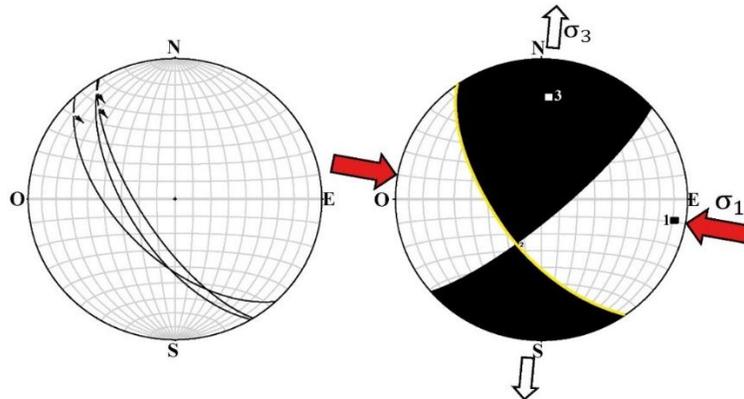


Figura 75: Ploteo de estrías de falla correspondiente a la EM-20.

Tabla 43: Parámetros Estructurales de la EM Ancosontine.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4860	99.5 °	10.4 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0026	208.3 °	60.5 °	VERTICAL	
σ_3	0.4885	4.1 °	27.3 °	HORICONTAL	

4.2.21. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 21: HUACANO GRANDE

Se encuentra ubicada a 1 km al oeste de la localidad de Huacano Grande (UTM: 386781E, 8047306N). Este afloramiento está compuesto de rocas de color gris oscuro, presenta una estructura bandeada, con minerales deformados de cuarzo, plagioclasas y micas. Según esta descripción corresponde a una anfibolita. Esta EM está conformada por 6 estrías de falla (Tabla 44) (Fig. 76).

Luego se han procesado los datos de las 6 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 77) representativo de la EM-21, con sus parámetros vectoriales (Tabla 45) y espaciales de los esfuerzos deformadores.



Figura 76: Estrías de falla en gneis del Complejo Basal de la Costa.

Tabla 44: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Grande.

Nº ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 238	66 NO	85 SO	I_X
E-2	N 263	49 NO	84 O	I_X
E-3	N 260	55 NO	86 SO	I_X
E-4	N 251	64 NO	84 SO	I_X
E-5	N 257	59 NO	81 SO	I_X
E-6	N 260	49 NO	77 O	I_X

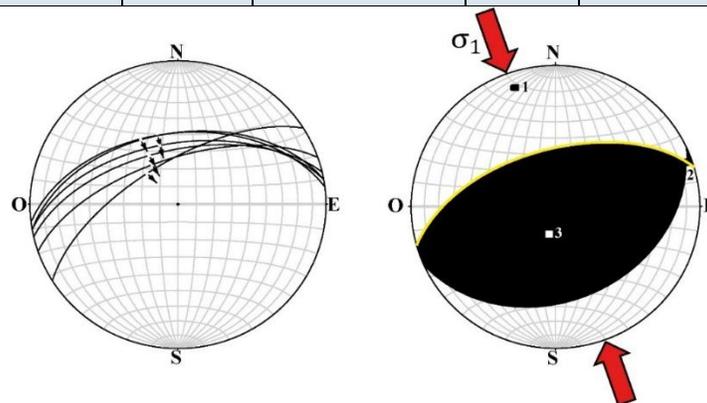


Figura 77: Ploteo de estrías de falla de la EM-21.

Tabla 45: Parámetros estructurales de la EM Huacano Grande.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.500	342.2 °	20.8 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.000	56.0 °	4.6 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.500	157.7 °	68.6 °	VERTICAL	

4.2.22. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 22: HUACANO GRANDE–SECTOR E

Ubicada al este de la localidad de Huacano Grande (UTM: 387616E, 8047376N), aproximadamente a 2 km de distancia. Este afloramiento está constituido por rocas de color rojizo, presentan una textura bandeada, con blastos de cuarzo, plagioclasas, feldespato alcalino y hornblendas. Ésta EM está conformada por la medida de 5 estrías de falla (Tabla N° 46) (Fig. 78). Luego se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 79) de la EM-22, con sus parámetros vectoriales (Tabla 47) de esfuerzos deformadores.



Figura 78: Estrías de falla en rocas gnéicas del Complejo Basal de la Costa.

Tabla 46: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Huacano Grande-Sector Este.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 45	78 SE	35 SO	D _X
E-2	N 45	69 SE	36 SO	D _X
E-3	N 44	76 SE	34 SO	D _X
E-4	N 48	74 SE	39 SO	D _X
E-5	N 43	75 SE	33 SO	D _X

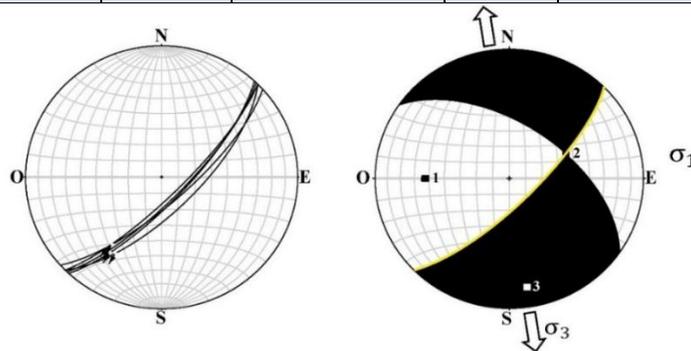


Figura 79: Ploteo de estrías de falla de la EM-22.

Tabla 47: Parámetros estructurales de la EM Huacano Grande-Sector Este.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4976	269.7 °	35.7 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0009	65.8 °	51.8 °	VERTICAL	
σ_3	0.4984	171.1 °	11.7 °	HORIZONTAL	

4.2.23. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 23: QUEBRADA TENINGUIRRE

Está ubicada en la Quebrada Teninguirre (UTM: 388149E, 8053897N), en el sector norte de Mal Paso, siguiendo el trayecto de la carretera hacia Tarata. El afloramiento consta de rocas de color violáceo, con una textura porfídica en matriz afanítica, con abundantes cristales de plagioclasas. Conformada por 5 medidas de estrías de falla (Tabla 48) (Fig. 80). Luego se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 81) representativo de la EM-23, con sus parámetros vectoriales (Tabla 49) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

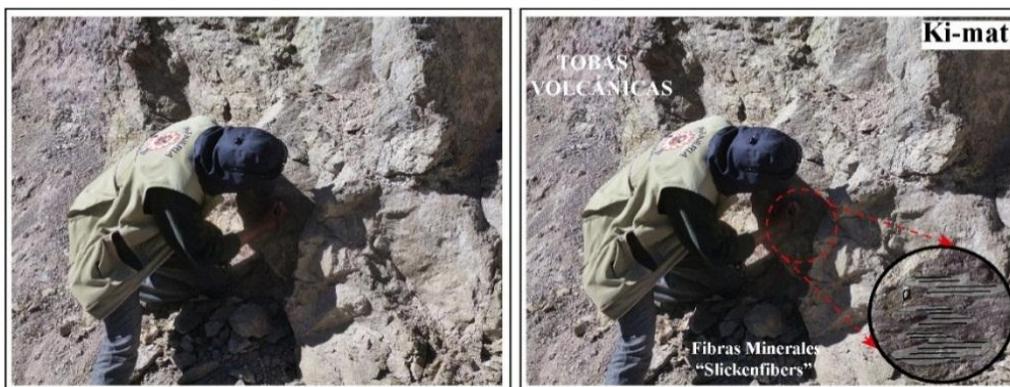


Figura 80: Estrías de falla en andesitas violáceas de la Formación Matalaque.

Tabla 48: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Teninguirre.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 235	87 NO	10 NE	D _x
E-2	N 230	88 NO	6 NE	D _x
E-3	N 241	78 NO	NE	D _x
E-4	N 232	71 NO	6 NE	D _x
E-5	N 243	69 NO	3 NE	D _x

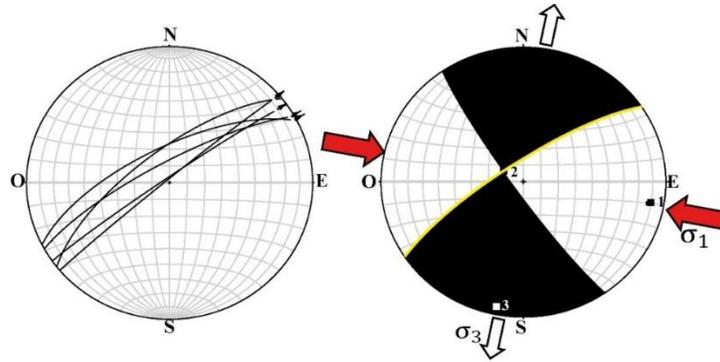


Figura 81: Ploteo de estrías de falla en la EM-23.

Tabla 49: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Teninguirre.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4907	100.2 °	12.4 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0054	298.4 °	76.9 °	VERTICAL	
σ_3	0.4853	191.1 °	3.9 °	HORIZONTAL	

4.2.24. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 24: MAL PASO – SECTOR NE

Se ubica entre la carretera de Huacano Grande - Tarata, (UTM: 387794E, 8053600N), aproximadamente a 2.6 km en dirección NNE de Mal Paso. Este afloramiento presenta rocas de color gris verdoso, con cristales de plagioclasa; donde se evidencia parcial silicificación. Ésta EM está conformada por 5 medidas de estrías de falla (Tabla 50) (Fig. 82). Luego se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 83) de la EM-24, con sus parámetros vectoriales (Tabla 51) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

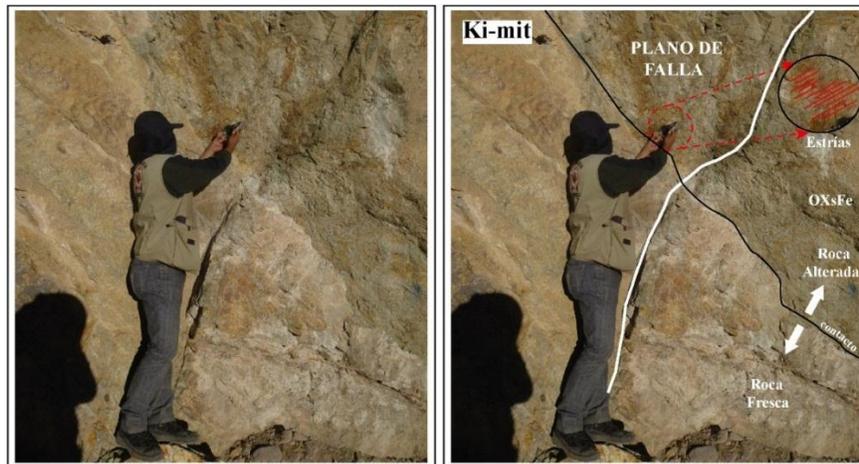


Figura 82: Milonitas silicificadas afectadas por la Falla Incapuquio.

Tabla 50: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mal Paso - Sector NE.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 75	62 SE	26 NE	S _X
E-2	N 80	77 SE	24 NE	S _X
E-3	N 88	66 SE	19 NE	S _X
E-4	N 93	69 SE	35 E	S _X
E-5	N 87	60 SE	25 NE	S _X

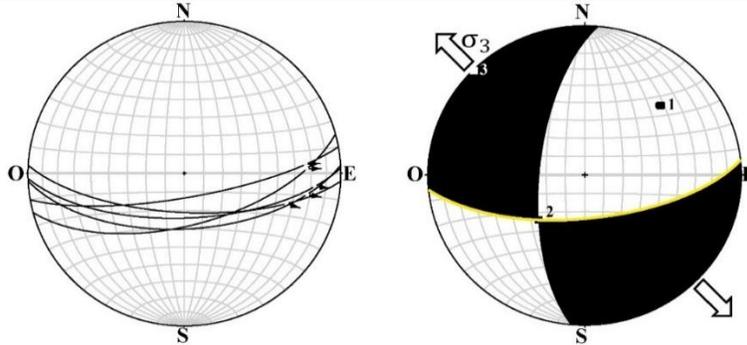


Figura 83: Ploteo de estrías de falla de la EM-24.

Tabla 51: Parámetros Estructurales de la EM Mal Paso-Sector NE.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4861	44.8 °	34.5 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0039	224.7 °	55.5 °	VERTICAL	
σ_3	0.4822	314.8 °	0.10 °	HORIZONTAL	

4.2.25. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 25: QUEBRADA TOCUCO A

Se encuentra ubicada hacia el sureste de Tocuco (UTM: 382165E, 8026395N), aproximadamente a 1 km de distancia en dirección SE. El afloramiento está constituido por areniscas de color rojizo, texturalmente presenta un grano medio a fino, el afloramiento se encuentra muy fracturado. Ésta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 52) (Fig. 84). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 85) representativo de la EM-25, con sus parámetros vectoriales (Tabla 53) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

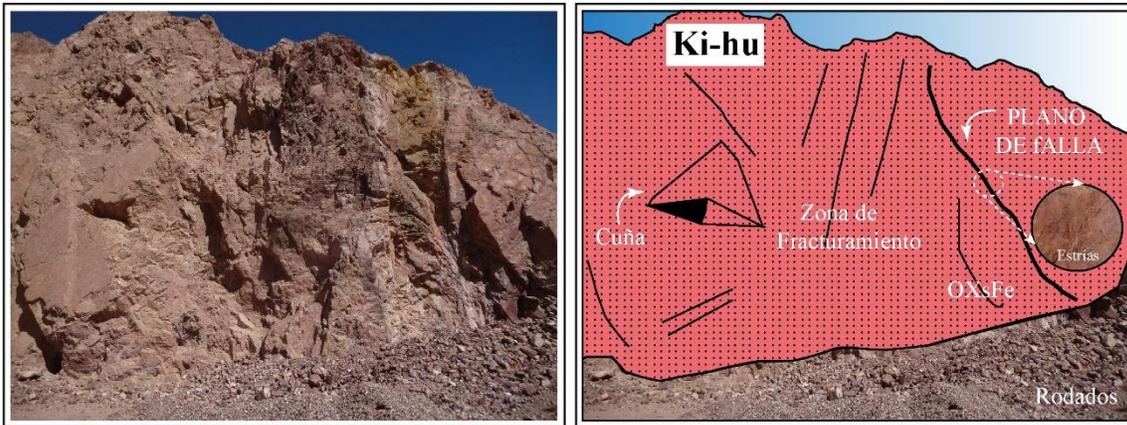


Figura 84: Estrías de falla en arenisca de la Formación Hualhuani.

Tabla 52: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco A.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 245	59 NO	74 SO	N _x
E-2	N 253	50 NO	83 SO	N _x
E-3	N 250	60 NO	81 SO	N _x
E-4	N 242	68 NO	78 SO	N _x

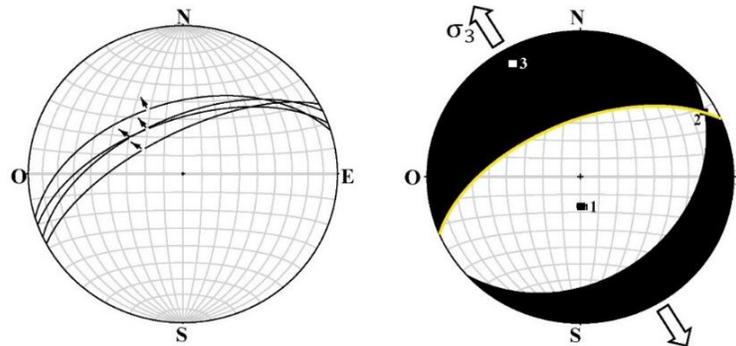


Figura 85: Ploteo de estrías de la EM-25.

Tabla 53: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco A.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4852	182.9 °	73.7 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0038	61.5 °	8.6 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4852	329.4 °	13.7 °	HORIZONTAL	

4.2.26. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 26: QUEBRADA TOCUCO B

Está ubicada a 150 m de la estación anterior (UTM: 382242E, 8026385N). Este afloramiento está constituido por areniscas rojizas de grano medio a fino, con cuarzos bien

seleccionados. Conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 54) (Fig. 86). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 87) representativo de la EM-26, con sus parámetros vectoriales (Tabla 55) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

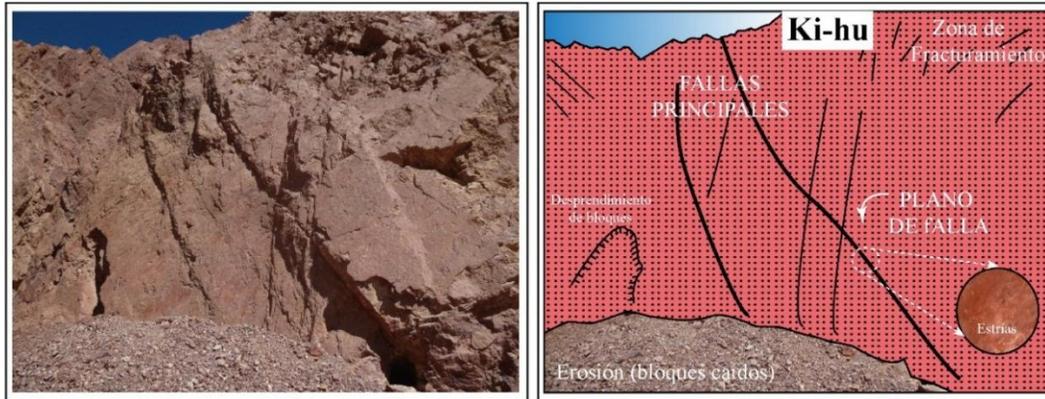


Figura 86: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.

Tabla 54: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco B.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 234	61 NO	84 SO	I _x
E-2	N 225	60 NO	85 SO	I _x
E-3	N 243	66 NO	80 SO	I _x
E-4	N 230	64 NO	83 SO	I _x

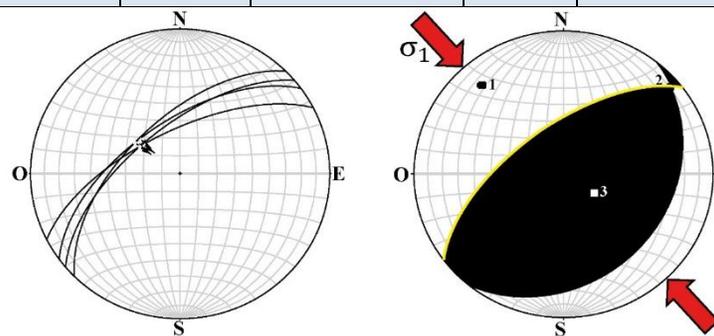


Figura 87: Ploteo de estrías de falla en la EM-26.

Tabla 55: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco B.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4949	317.7 °	17.4 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0022	49.7 °	6.5 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4971	159.5 °	71.4 °	VERTICAL	

4.2.27. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 27: QUEBRADA TOCUCO C

Se encuentra aproximadamente a 100 m de la estación anterior (UTM: 382191E, 8026397N). Este afloramiento está compuesto de areniscas rojizas de grano medio a fino, con granos redondeados. Ésta EM está conformado por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 56) (Fig. 88). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 89) representativo de la EM-27, con sus parámetros vectoriales (Tabla 57) y espaciales de los esfuerzos deformadores

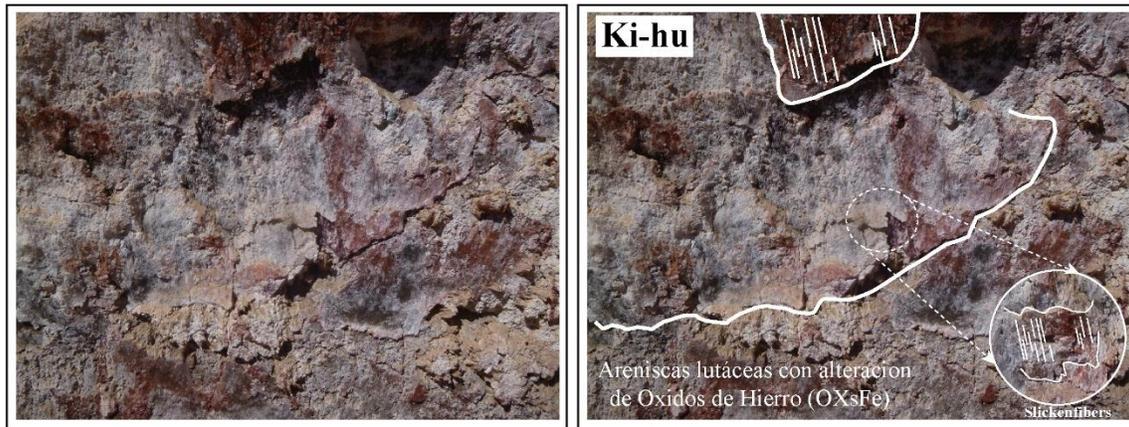


Figura 88: Estrías de falla en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.

Tabla 56: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco C.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 66	80 SE	77 SO	N_x
E-2	N 65	80 SE	79 SO	N_x
E-3	N 70	76 SE	82 SO	N_x
E-4	N 64	82 SE	81 SO	N_x

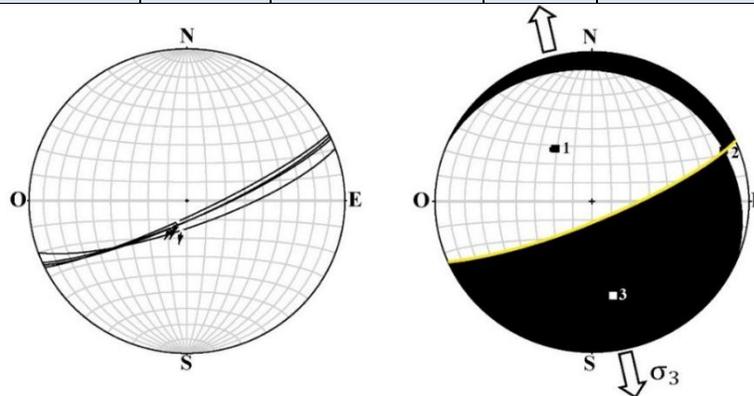


Figura 89: Ploteo de estrías de falla de la EM-27.

Tabla 57: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco C.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4982	323.6 °	54.4 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0002	68.2 °	10.2 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4984	165.1 °	33.7 °	HORIZONTAL	

4.2.28. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 28: QUEBRADA TOCUCO D

Está ubicada a 100 m en dirección noreste de la estación anterior (UTM: 382372E, 8026484N). El afloramiento está compuesto de areniscas blanquecinas con patinas de óxidos de hierro que corresponden a la Formación Hualhuani. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 58) (Fig. 90). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 91) representativo de la EM-28, con sus parámetros vectoriales (Tabla 59) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

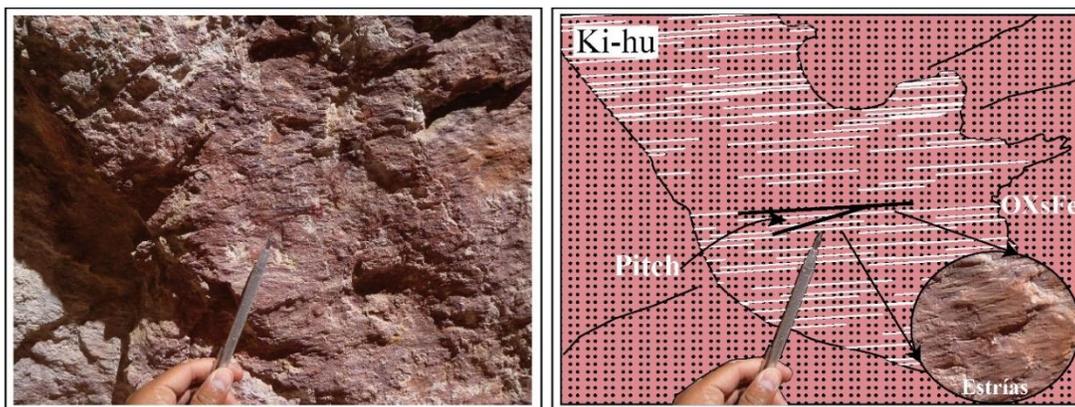


Figura 90: Estrías de un movimiento sinistral en areniscas de la Formación Hualhuani.

Tabla 58: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco D.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 162	85 SO	10 S	S _x
E-2	N 173	87 SO	12 S	S _x
E-3	N 169	84 SO	16 S	S _x
E-4	N 170	82 SO	13 S	S _x

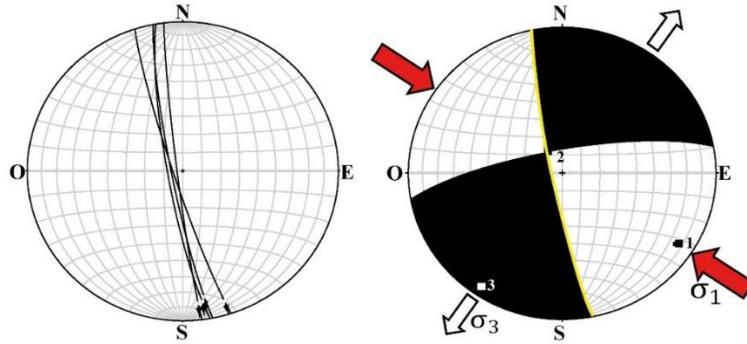


Figura 91: Ploteo de estrías de falla en la EM-28.

Tabla 59: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco D.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4947	123.5 °	13.0 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0000	325.3 °	76.0 °	VERTICAL	
σ_3	0.4946	214.7 °	5.0	HORIZONTAL	

4.2.29. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 29: QUEBRADA TOCUCO E

Está ubicada a 0.8 km en dirección sureste de la estación anterior (UTM: 383156E, 8026095N). El afloramiento está compuesto por areniscas cuarzosas de color blanquecino en estratos subverticales bien definidos. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 60) (Fig. 92). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 93) representativo de la EM-29, con sus parámetros vectoriales (Tabla 61) y espaciales de los esfuerzos deformadores

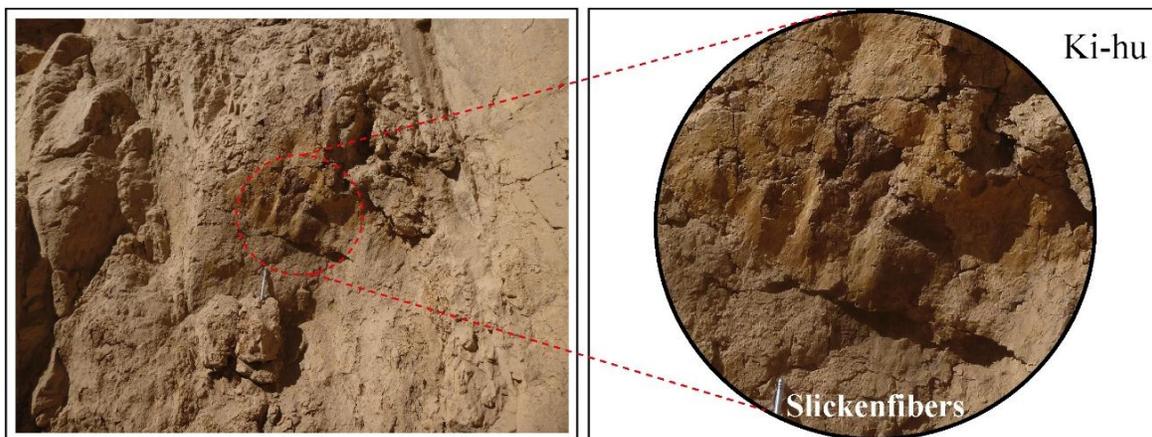


Figura 92: Estrías de falla con movimiento inverso en areniscas de la Formación Hualhuani.

Tabla 60: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco E.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 210	84 NO	48 SO	I_x
E-2	N 224	83 NO	45 SO	I_x
E-3	N 216	82 NO	41 SO	I_x
E-4	N 214	84 NO <td 43 SO	I_x	

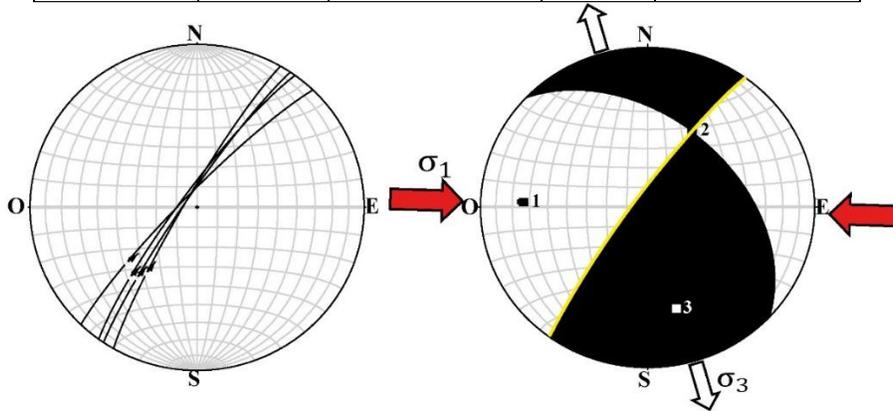


Figura 93: Ploteo de estrías de falla de la EM-29.

Tabla 61: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco E.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4940	272.5 °	24.2 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0002	29.2 °	45.0 °	VERTICAL	
σ_3	0.4942	164.0 °	35.2 °	HORIZONTAL	

4.2.30. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 30: QUEBRADA TOCUCO F

Está ubicada aproximadamente a 0.7 km en dirección noroeste de la estación anterior (UTM: 382361E, 8026523N). El afloramiento está compuesto de areniscas de color blanquecino, de grano medio a fino, con granos seleccionados de cuarzo y con patinas de óxidos de hierro. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 62) (Fig. 94). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 95) de la EM-30, con sus parámetros vectoriales (Tabla 63) de los esfuerzos deformadores.

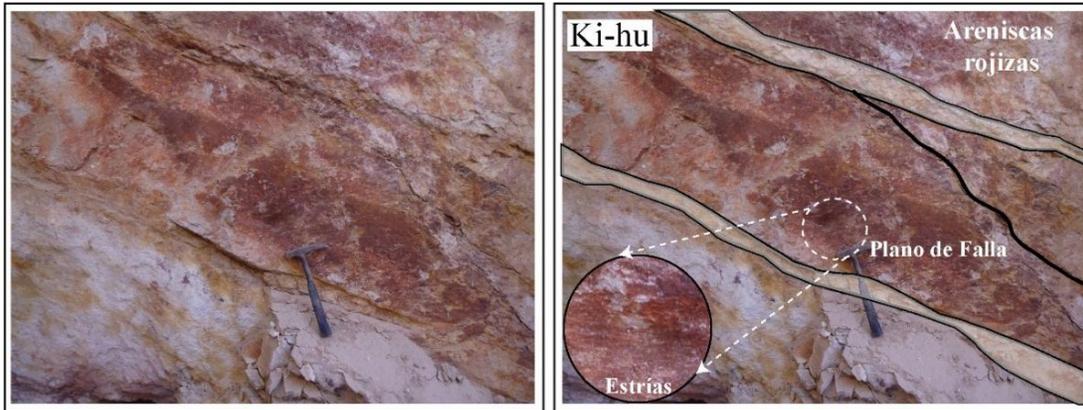


Figura 94: Estrías de falla con movimiento sinistral en areniscas de la Formación Hualhuani.

Tabla 62: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco F.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 172	85 SO	7 S	S_x
E-2	N 175	82 O	3 S	S_x
E-3	N 179	80 O	10 S	S_x
E-4	N 171	81 SO	8 S	S_x

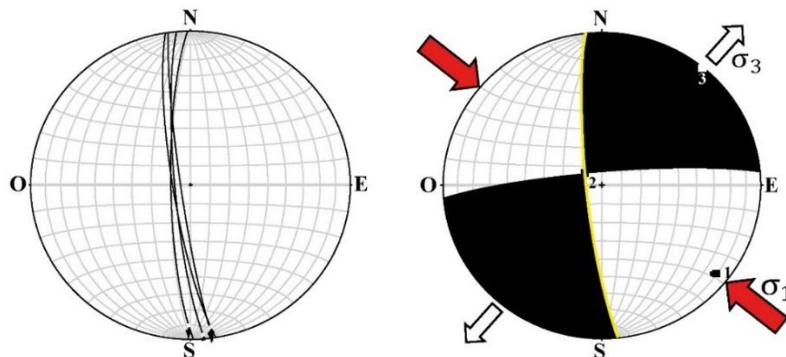


Figura 95: Ploteo de estrías de falla de la EM-30.

Tabla 63: Parámetros Estructurales de la EM Quebrada Tocuco E.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4958	129.8 °	10.6 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0006	305.2 °	79.4 °	VERTICAL	
σ_3	0.4964	39.7 °	0.8 °	HORIZONTAL	

4.2.31. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 31: QUEBRADA TOCUCO G

Se encuentra aproximadamente a 125 m en dirección sur de la estación anterior (UTM: 382322E, 8026404N). Este afloramiento está compuesto de areniscas de color rojizo texturalmente de grano fino a medio, intensamente fracturado. Esta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 64) (Fig. 96). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 97) representativo de la EM-31, con sus parámetros vectoriales (Tabla 65) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

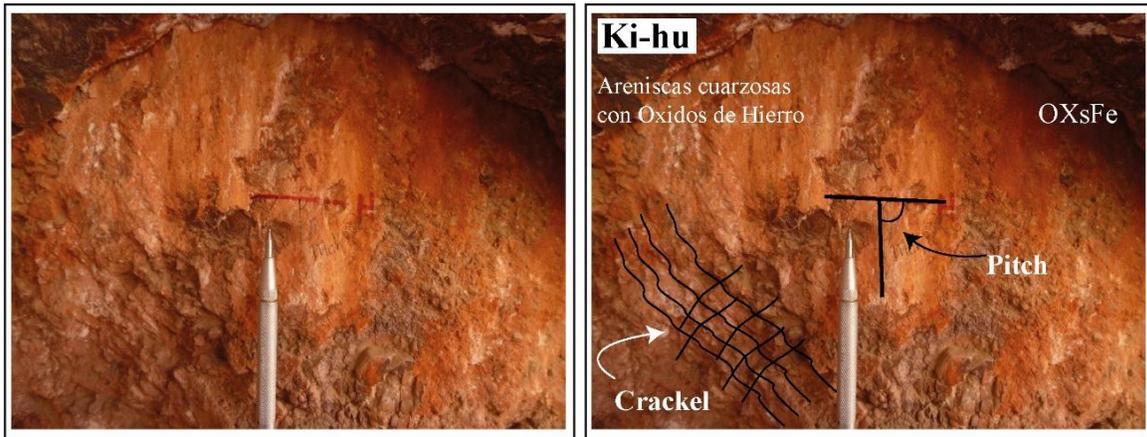


Figura 96: Estrías de una falla inversa en areniscas rojizas de la Formación Hualhuani.

Tabla 64: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Quebrada Tocuco G.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 243	78 NO	74 NE	I _x
E-2	N 232	78 NO	84 NE	I _x
E-3	N 236	82 NO	77 NE	I _x
E-4	N 241	79 NO	76 NE	I _x

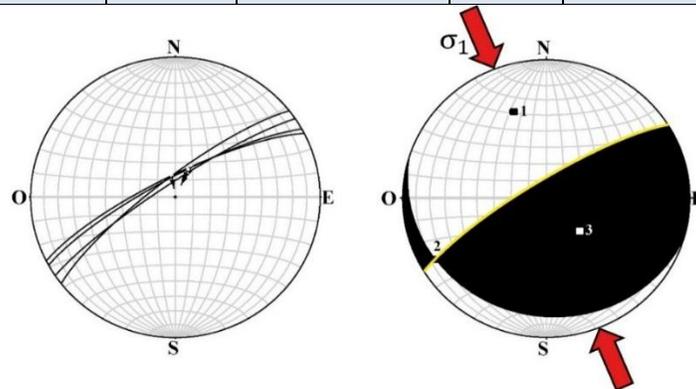


Figura 97: Ploteo de estrías de falla de la EM-31.

Tabla 65: Parámetros estructurales de la EM Quebrada Tocuco G.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4939	338.5 °	33.5 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0054	240.3 °	12.1 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4993	133.4 °	53.8 °	VERTICAL	

4.2.32. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 32: TACATA

Ubicada al sureste del Cerro Tacata (UTM: 390746E, 8057967N) aproximadamente a 1.25 km de distancia. El afloramiento está compuesto por tobas volcánicas de color violáceo, de textura porfídica de la Fm. Tarata. Conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 66) (Fig. 98). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 99) de la EM-32, con sus parámetros vectoriales (Tabla 67).

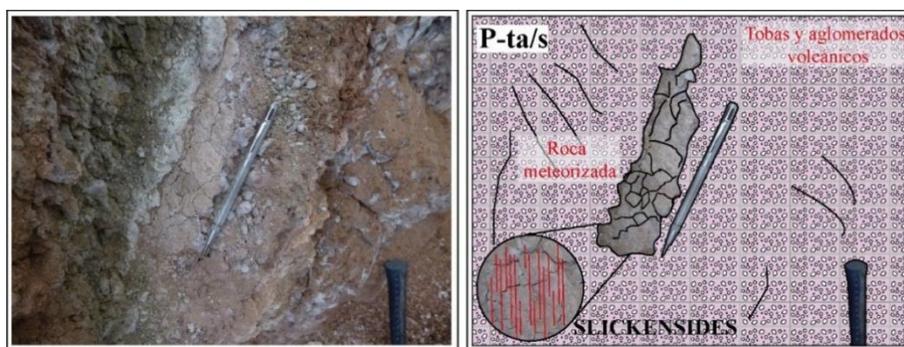


Figura 98: Estrías de falla dextral en tobas piroclásticas de la Formación Tarata.

Tabla 66: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Tacata.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 292	83 NE	44 SE	D _x
E-2	N 294	84 NE	42 SE	D _x
E-3	N 294	56 NE	22 NO	D _x
E-4	N 296	54 NE	36 NO	D _x

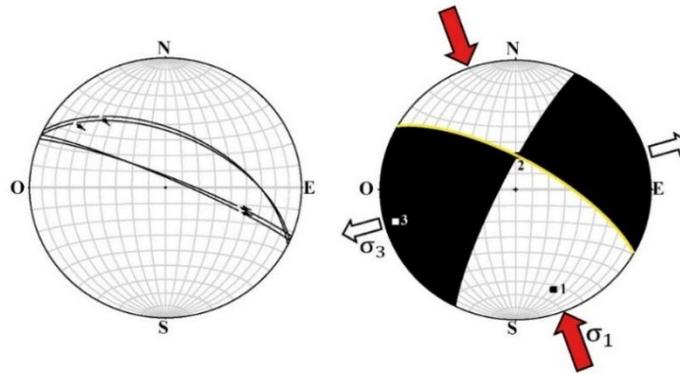


Figura 99: Ploteo de estrías de falla en la EM-32.

Tabla 67: Parámetros estructurales de la EM Tacata.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4652	161.3 °	19.8 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.1416	3.1 °	68.8 °	VERTICAL	
σ_3	0.3236	253.9 °	7.3 °	HORIZONTAL	

4.2.33. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 33: TALAME

Se encuentra cerca a la Quebrada Talame (UTM: 390498E, 8056972N), aproximadamente a 2 km al noroeste del Cerro Talame. El afloramiento está compuesto por andesitas de color verdoso que presentan alteración. Ésta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 68) (Fig. 100). Luego se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 101) representativo de la EM-33, con sus parámetros vectoriales (Tabla 69) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

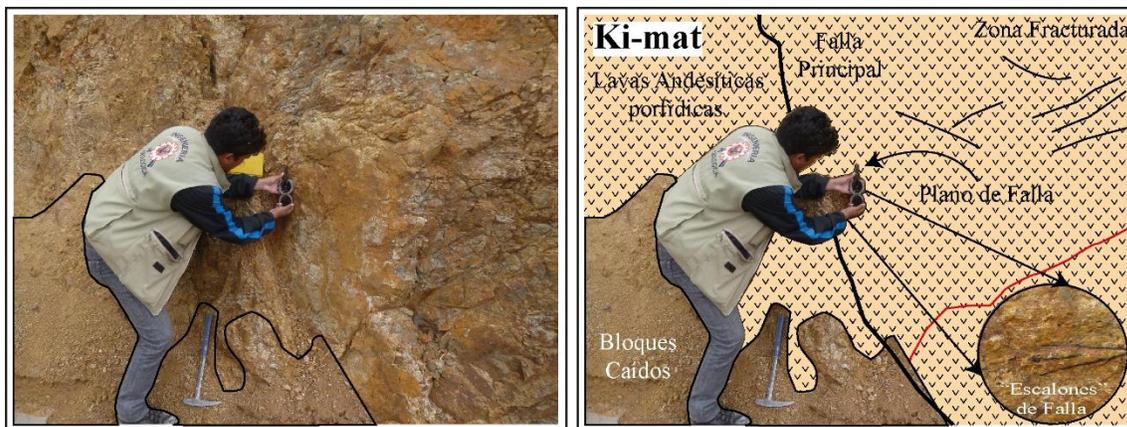


Figura 100: Plano de falla dextral en rocas volcánicas de la Formación Matalaque.

Tabla 68: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Talame.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 60	79 SE	78 NE	I _X
E-2	N 61	79 SE	4 SO	D _X
E-3	N 62	79 SE	76 NE	I _X
E-4	N 63	79 SE	6 SO	D _X

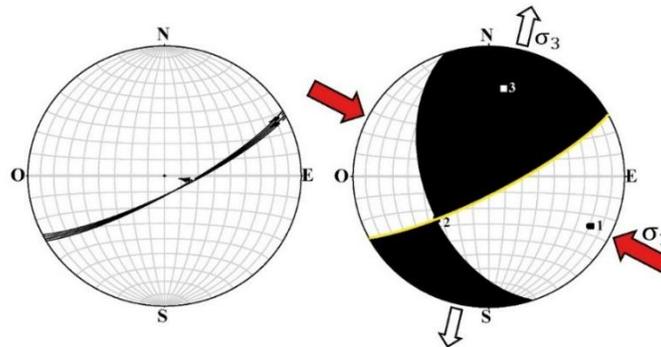


Figura 101: Ploteo de estrías de falla de la EM-33.

Tabla 69: Parámetros Estructurales de la EM Talame.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4064	117.4 °	18.8 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0033	229.5 °	47.9 °	VERTICAL	
σ_3	0.4031	13.1 °	36.1 °	HORIZONTAL	

4.2.34. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 34: PALQUILLA

Se encuentra ubicada al noroeste de la localidad de Palquilla (UTM: 390188E, 8055696N) aproximadamente a 2 km de distancia. El afloramiento está constituido por rocas de color verde oscuro que presenta esporádicos fragmentos líticos. Ésta EM está conformada por 4 medidas de estrías de falla (Tabla 70) (Fig. 102). Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 103) representativo de la EM-34, con sus parámetros vectoriales (Tabla 71) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

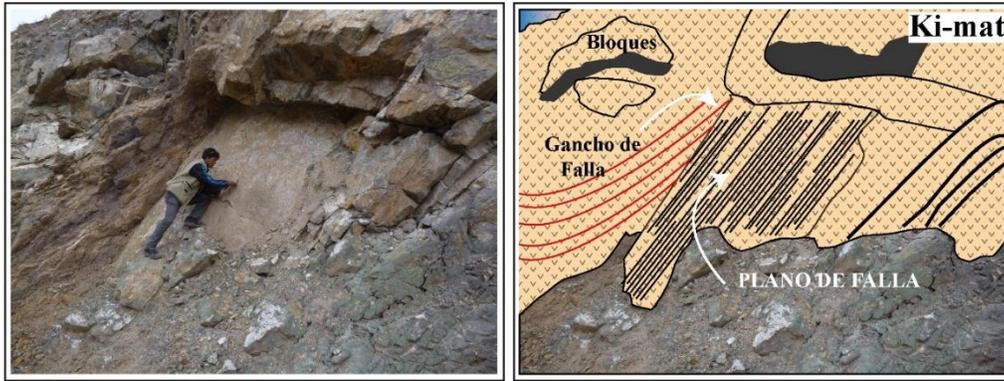


Figura 102: Plano de una falla normal en tobas líticas de la Formación Matalaque.

Tabla 70: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Palquilla.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 188	83 NO	86 NE	N_x
E-2	N 186	86 NO	89 SO	N_x
E-3	N 205	86 NO	76 NE	N_x
E-4	N 208	84 NO	79 NE	N_x

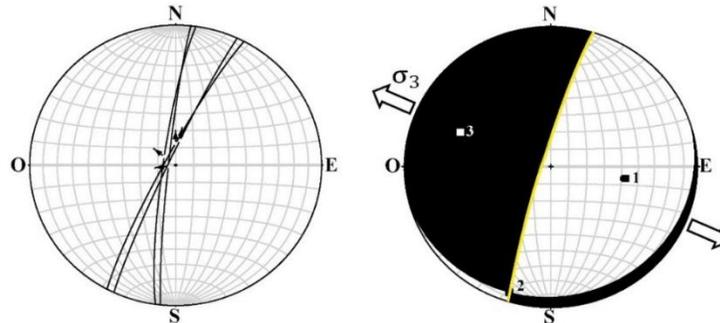


Figura 103: Ploteo de estrías de falla de la EM-34.

Tabla 71: Parámetros Estructurales de la EM Palquilla.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4977	99.7 °	49.4 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0184	197.5 °	6.7 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.4793	293.1 °	39.8 °	HORIZONTAL	

4.2.35. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 35: INCAPUQUIO

Esta se ubica sobre el rumbo de la falla Incapuquio, y se encuentra 2 km al norte de Mal Paso (UTM: 387186E, 8053199N). El afloramiento está compuesto por rocas de color

verdoso oscuro, la roca se encuentra silicificada. Ésta EM cuenta con 4 medidas de estrías de falla (Tabla 72) (Fig. 104).

Posteriormente se han procesado los datos de las 4 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 105) representativo de la EM-35, con sus parámetros vectoriales (Tabla 73) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

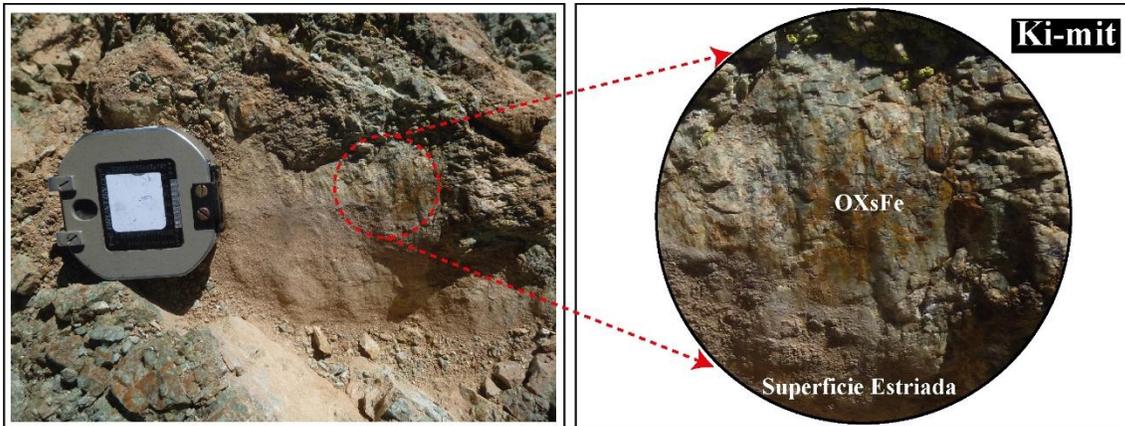


Figura 104: Estrías de falla en Milonitas silicificadas.

Tabla 72: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Incapuquio.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 214	68 NO	14 SO	S_X
E-2	N 95	34 SO	74 SE	I_X
E-3	N 270	80 N	43 E	S_X
E-4	N 232	83 NO	65 SO	S_X

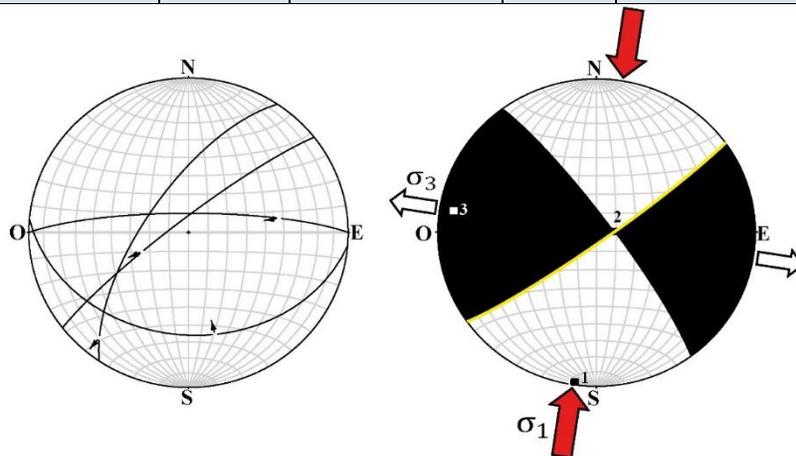


Figura 105: Ploteo de estrías de falla de la EM-35.

Tabla 73: Parámetros Estructurales de la EM Incapuquio.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2867	189.0 °	1.6 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0898	89.1 °	80.8 °	VERTICAL	
σ_3	0.1969	279.2 °	9.1 °	HORIZONTAL	

4.2.36. ESTACIÓN MICROTECTÓNICA N° 36: TAUJA

Se encuentra cerca a la Quebrada Tauja (UTM: 385761E, 8053278N), aproximadamente a 2 km al noreste del Cerro Machani. Este afloramiento consta de areniscas de coloración verde plomizo, con una textura de grano fino. Ésta EM está conformada por 5 estrías de falla (Tabla 74) (Fig. 106). Posteriormente se han procesado los datos de las 5 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 107) representativo de la EM-36, con sus parámetros vectoriales (Tabla 75) y espaciales de los esfuerzos deformadores.



Figura 106: Estrías de falla con movimiento sinistral, en areniscas de la Grupo Cabanillas.

Tabla 74: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Tauja.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 21	52 SE	15 SO	S _x
E-2	N 12	45 SE	5 S	S _x
E-3	N 18	55 SE	3 S	S _x
E-4	N 357	70 E	3 SO	S _x
E-5	N 5	45 E	11 S	S _x

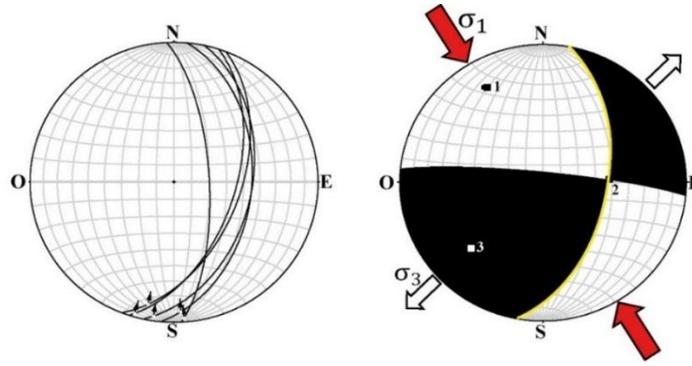


Figura 107: Ploteo de estrías de falla de la EM-36.

Tabla 75: Parámetros Estructurales de la EM Tajuja.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.4761	328.9 °	20.7 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0017	87.8 °	51.9 °	VERTICAL	
σ_3	0.4778	226.1 °	30.4 °	HORIZONTAL	

4.2.37. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 37: MACHANI

Ubicada al noreste del Cerro Machani (UTM: 385757E, 8053216N) aproximadamente a 1.8 km de distancia. Este afloramiento está compuesto de areniscas de coloración verde plomizo, de grano fino. Conformada por 3 medidas de estrías de falla (Tabla 76) (Fig. 108). Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin, trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 109) representativo de la EM-37, con sus parámetros vectoriales (Tabla 77) y espaciales de los esfuerzos deformadores.



Figura 108: Estrías de una falla normal en areniscas verdosas del Grupo Cabanillas.

Tabla 76: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Machani.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 250	64 NO	10 SE	S_X
E-2	N 242	70 NO	8 SE	S_X
E-3	N 249	66 NO	3 E	S_X

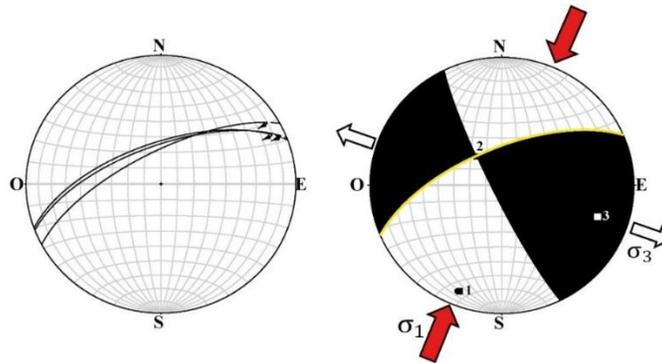


Figura 109: Ploteo de estrías de falla de la EM-37.

Tabla 77: Parámetros Estructurales de la EM Machani.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.5000	205.3 °	11.5 °	HORIZONTAL	TRANSFORMANTE
σ_2	0.0000	318.1 °	62.3 °	VERTICAL	
σ_3	0.5000	109.9 °	24.9 °	HORIZONTAL	

4.2.38. ESTACIÓN MICROTTECTÓNICA N° 38: MAL PASO NORTE

Está ubicada al norte de Mal Paso (UTM: 387417E, 8053009N) aproximadamente a 2 km de distancia. Este afloramiento está compuesto por Milonitas silicificadas y se encuentra muy cercana al lineamiento principal de la Falla Incapuquio. Ésta EM está conformada por 3 medidas de estrías de falla (Tabla 78) (Fig. 110).

Luego se han procesado los datos de las 3 estrías en el Software Faultkin (Ploteo de estrías), trabajando de manera estadística se ha obtenido un promedio estereográfico (Fig. 111) representativo de la EM-38, con sus parámetros vectoriales (Tabla 79) y espaciales de los esfuerzos deformadores.

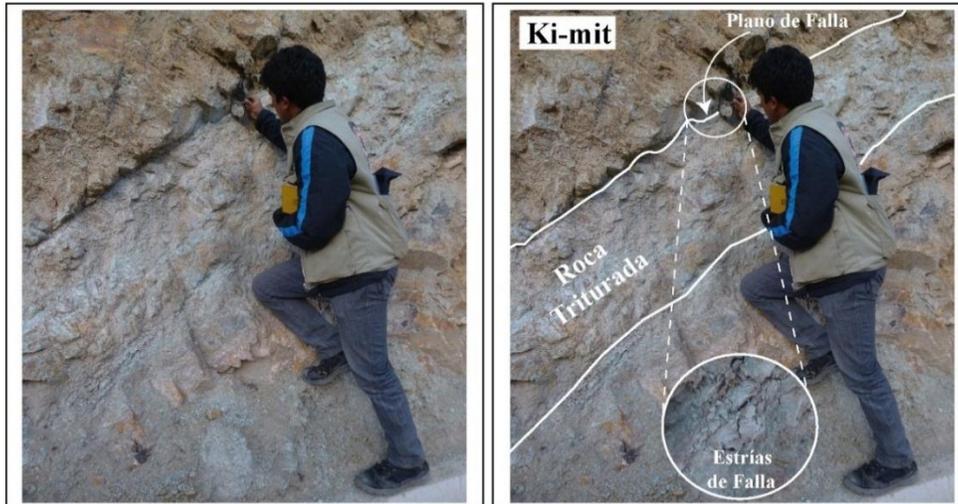


Figura 110: Estrías de falla en milonitas silicificadas.

Tabla 78: Indicadores cinemáticos de la Estación Microtectónica Mal Paso Norte.

N° ESTRÍA	RUMBO	BUZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA
E-1	N 294	43 NE	86 NO	I _x
E-2	N 65	83 SE	0	D _x
E-3	N 44	72 SE	70 NE	D _x

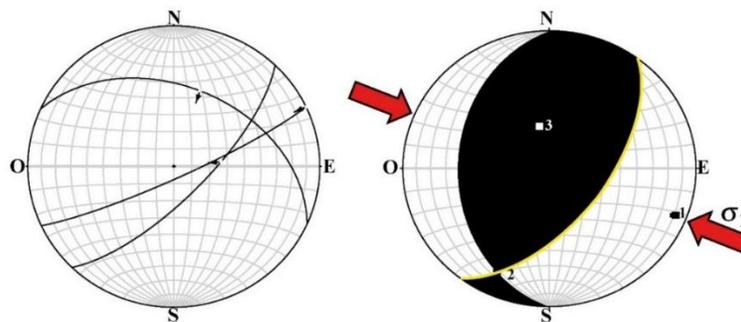


Figura 111: Ploteo de estrías de falla de la EM-38.

Tabla 79: Parámetros Estructurales de la EM Mal Paso Norte.

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3012	112.1 °	10.7 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0063	205.5 °	17.6 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.3075	352.4 °	69.2 °	VERTICAL	

4.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN SECCIONES DELGADAS

En este acápite de la investigación, se ha desarrollado el análisis microestructural en secciones delgadas de muestras de campo tomadas en zonas estratégicas; con la finalidad de tener un mejor panorama de la configuración estructural de la Cuenca Arequipa en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x). Estos modelos de deformación intentan explicar el comportamiento de las rocas en un entorno frágil-dúctil, además sirve como modelos incluso para explicar deformaciones a escala regional, esto enlazado mediante la teoría de los fractales (Mandelbrot, 1975; Gumiel, 1996; Gumiel et al., 1996) que en la actualidad tiene mucha acogida por su aplicabilidad a la geología y en especial a la tectónica y microtectónica (Pérez, 2003).

Para realizar este estudio, en primer lugar se busca muestras de rocas que registren *slickensides* (estrías de falla) y se la orienta al norte magnético, incluyendo una línea horizontal respecto al nivel del mar y la dirección de corte (Fig. 112) la cual se toma en cuenta al momento de cortar la muestra en los laboratorios de INGEMMET, posteriormente se extrae la muestra con mucha cautela; para que de esta manera los caracteres marcados con plumón indeleble no sean fracturados ni borrados.

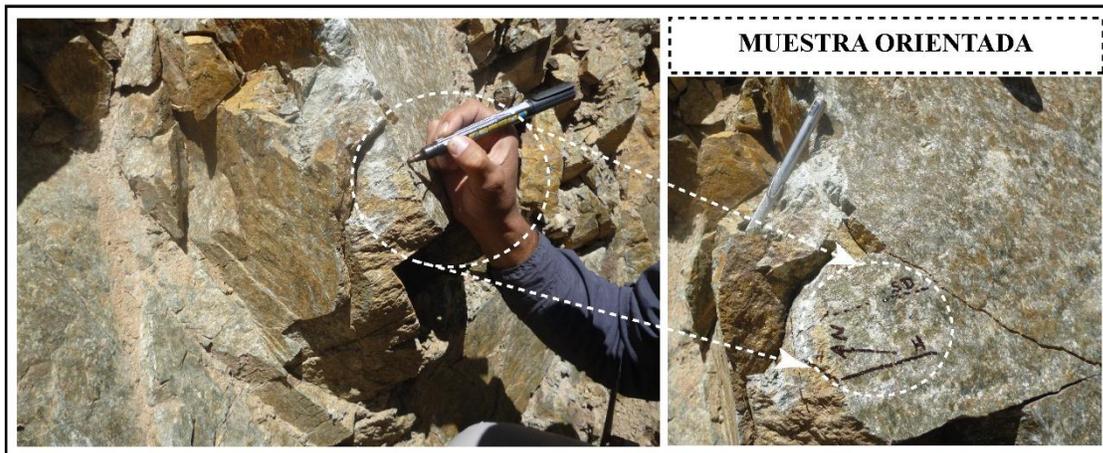


Figura 112: Recolección de muestras de campo orientadas, para su posterior análisis microestructural en secciones delgadas.

Posteriormente las muestras de las secciones delgadas se analizan una por una (en gabinete) mediante la observación y análisis en el microscopio petrográfico de luz transmitida (que cuentan los laboratorios de Ingemmet) (Fig. 113). Cada muestra posee caracteres señalados en campo que posteriormente se direcciona y se envía a corte, y luego se obtienen secciones delgadas de 30 micras de espesor para su respectivo análisis.

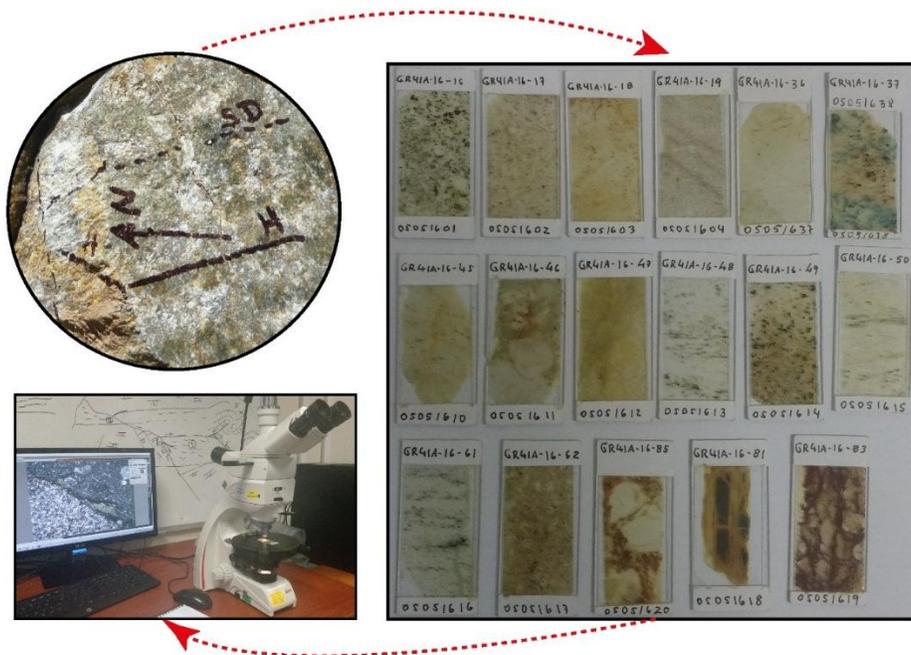


Figura 113: Tratamiento de las 17 muestras destinadas para análisis microestructural en secciones delgadas, en el Laboratorio de Microscopia de Ingemmet.

Se ha considerado conveniente realizar modelos que representen las microestructuras que se han observado en cada sección delgada (Fig. 114), agenciados de literatura referente al tema., además se ha modificado formatos de descripción petromineralógica de secciones delgadas y adaptado al análisis microestructural (ver Anexo N°1: Formatos sobre estudio microestructural para rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas).



Figura 114: Observación y análisis microestructural en secciones delgadas empleando microscopio petrográfico Leica.

Un plus de este trabajo es corroborar las composición litológica de las unidades litoestratigráficas de la zona de estudios, siendo el enfoque principal el estudio microestructural, producto de los esfuerzos diferenciales.

Para este estudio se han analizado 17 muestras de sección delgada, entre rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, distribuidas principalmente en tres sectores (Fig. 115) del área de estudios (Sector de Tocuco, Sector de Palca, Sector de Huacano) donde afloran las principales fallas regionales, como la Falla Incapuquio que atraviesa el sector de Huacano Chico y Huacano Grande en dirección NO-SE; las fallas Palca y Junerata que se intersectan en los alrededores de Palca; y la Falla Calientes que afecta gran parte del sector de Tocuco (Benavente, 2008). Cada muestra tiene sus parámetros de campo (coordenadas, codificación, descripción, etc.) (Tabla 80).

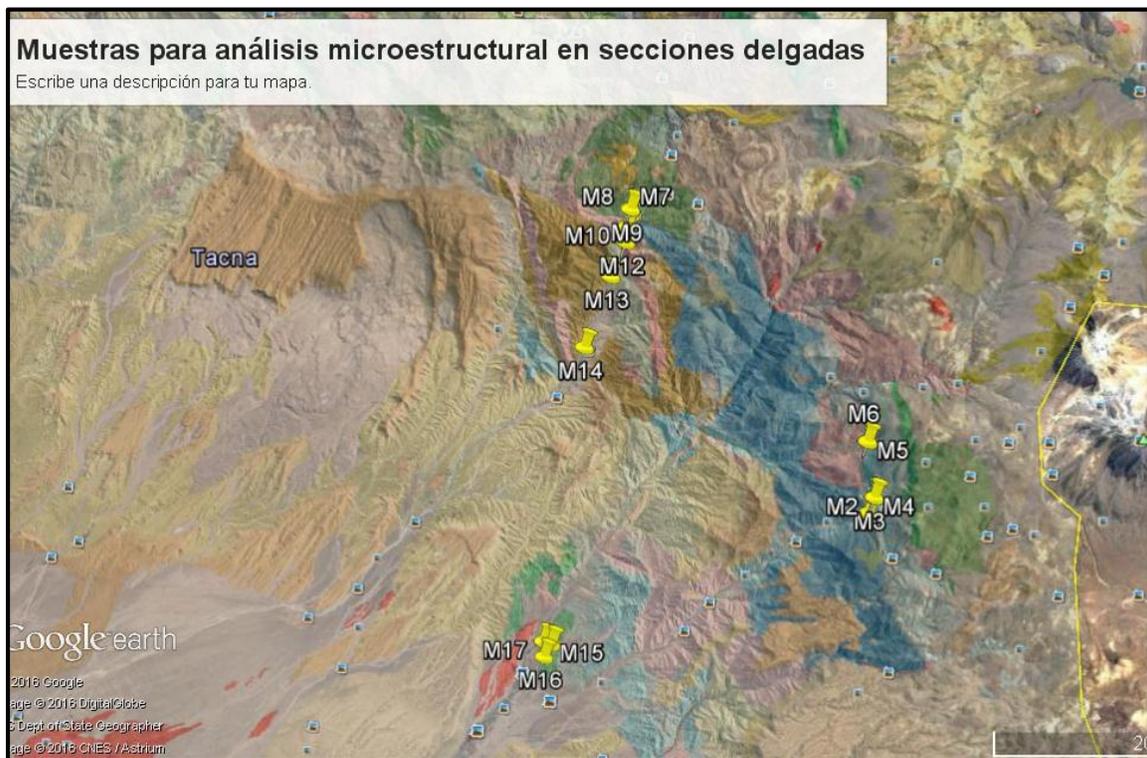


Figura 115: Ubicación y distribución espacial de 17 muestras orientadas en los Cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x).

Tabla 80: Ubicación y características de las muestras de campo para estudios microestructurales.

N°	CÓDIGO	X	Y	Z	LITOLOGÍA	MICROESTRUCTURAS
1	GR41A-16-16	402352	8034997	3365	Granodiorita	Zona de dilatación
2	GR41A-16-17	402755	8035933	3308	Lava andesítica	Splaying (cola de caballo)
3	GR41A-16-18	402702	8035932	3399	Plagiodacita	Sombras de presión
4	GR41A-16-19	402721	8035929	3388	Lava andesítica	Splaying Conjugado
5	GR41A-16-36	402224	8039366	3771	Mármol	Zona de Cizalla
6	GR41A-16-37	402224	8039366	3771	Skarn Silicificado	Clivaje bidireccional
7	GR41A-16-45	387692	8053488	3090	Pseudotaquillita	Zonas de Brechamiento
8	GR41A-16-46	387692	8053488	3090	Brecha Volcánica	Boudinage
9	GR41A-16-47	387692	8053488	3090	Lava Silicificada	Estilolitas
10	GR41A-16-48	387487	8052421	3074	Gneis	Bandeamiento
11	GR41A-16-49	387447	8052048	3052	Diorita	Macla polisintética
12	GR41A-16-50	387393	8051488	3026	Gneis migmatítico	Zona de Cizalla
13	GR41A-16-61	386466	8049398	2890	Gneis	Peces de Mica
14	GR41A-16-62	384826	8045035	2614	Metamonzodiorita	Fracturas Anastomasadas
15	GR41A-16-81	382662	8026238	1526	Arenisca ferruginosa	Fracturas de tensión
16	GR41A-16-83	382200	8025407	1366	Brecha de falla	Cataclastita
17	GR41A-16-85	382163	8026398	1449	Meta arenisca	Zona de recristalización

4.3.1. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL EN SECCIONES DELGADAS

Para la descripción y análisis microestructural en secciones delgadas se toma fotomicrografías a través del microscopio petrográfico Leica (margen izquierda de las imágenes) con sus respectivos esquemas explicativos o ilustrativos (margen derecha).

MUESTRA N°1: GR41A-16-16

Esta muestra fue extraída en el sector SO de Chulpapalca (UTM: 402352, 8034997), perteneciente al Batolito Challaviento. Tomada cerca a la Falla Junerata de dirección NO-SE, donde se hallan zonas de dilatación (Fig. 116), que son microestructuras generadas por esfuerzos diferenciales de carácter distensivo (Bons, 2012) y generan rupturas o zonas de separación. (Ver Anexo N°1, M-1).

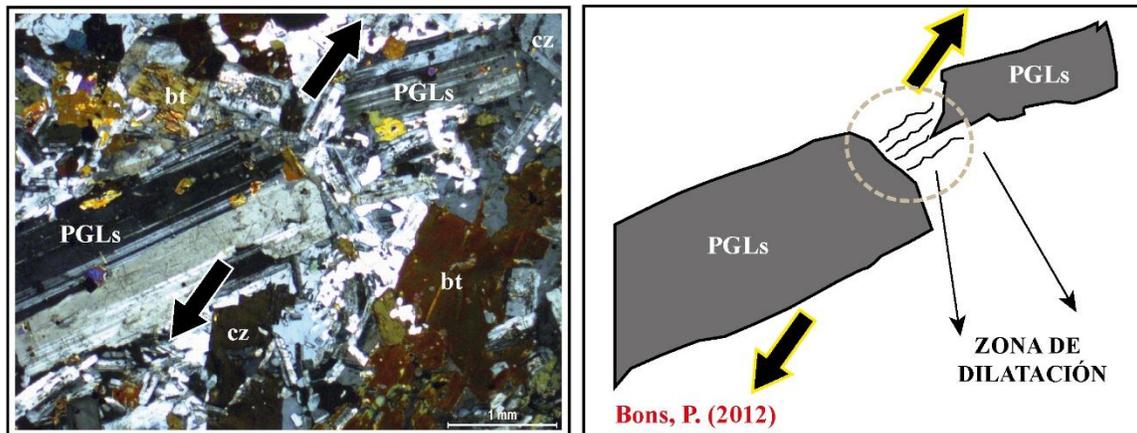


Figura 116: Zonas de dilatación en la muestra GR41A-16-16.

MUESTRA N°2: GR41A-16-17

Esta muestra fue extraída cercana a la localidad de Chulpapalca (UTM: 402755, 8035933), correspondiente a una lava andesítica o cuarzo-andesita. Esta muestra fue tomada cerca a la Falla Junerata, donde se han encontrado “*Splaying*” que son fracturas secundarias (Fig. 117) que se representan en forma de abanico (Fossen, 2010), estas fracturas tienen un desplazamiento lateral derecho y forman estructuras denominadas “colas de caballo” que son indicadores del dinamismo de una falla. (Ver Anexo N°1, M-2).

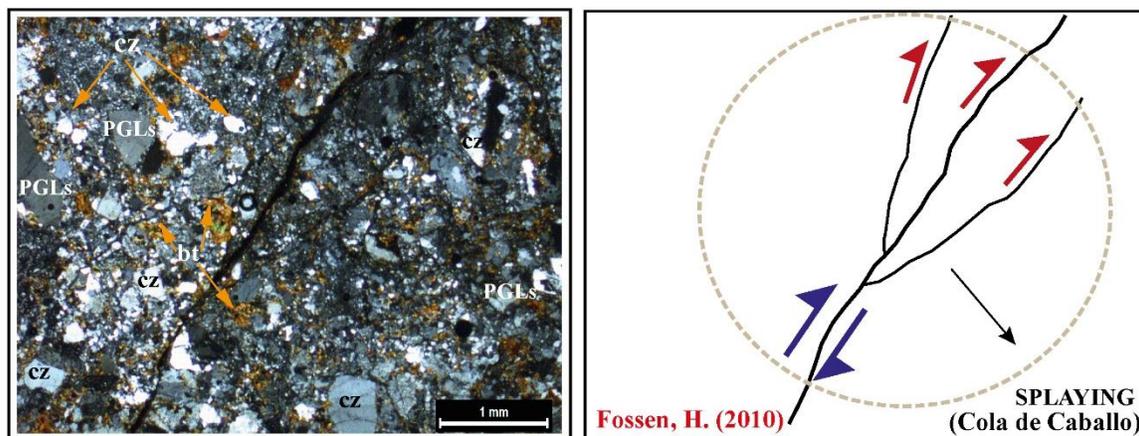


Figura 117: *Splaying* (cola de caballo) en la muestra GR41A-16-17

MUESTRA N°3: GR41A-16-18

Esta muestra fue extraída cercana a la localidad de Chulpapalca (UTM: 402702, 8035932), correspondiente a una lava andesítica o plagiocacita. Tomada cerca a la Falla Junerata,

donde se han encontrado “*Fringe Structure*” o sombras de presión (Bons, 2012), que son indicadores cinemáticos respecto al sentido de movimiento de la Falla Junerata (Fig. 118), el movimiento visto en sección delgada muestra el carácter sinistral de esta Falla, que pertenece al SFI. (Ver Anexo N°1, M-3).

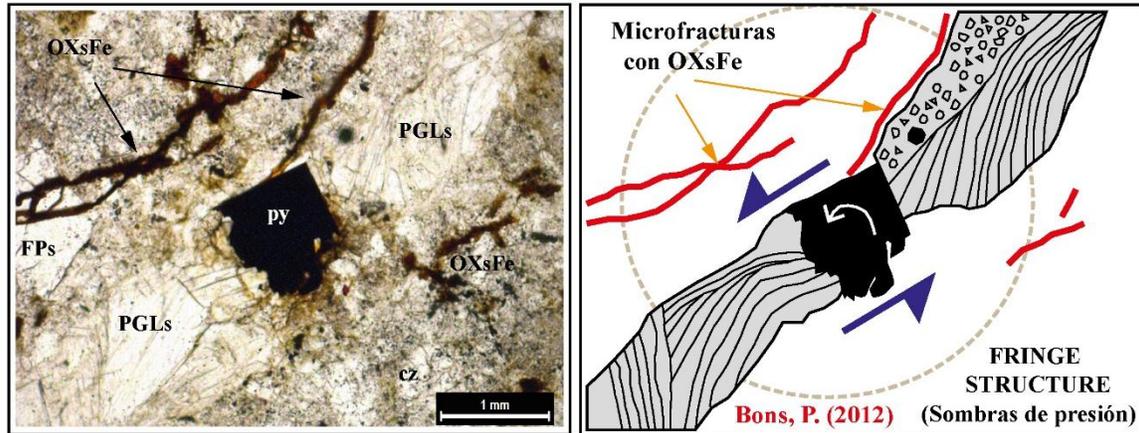


Figura 118: *Fringe Structure* (sombras de presión) en la muestra GR41A-16-18.

MUESTRA N°4: GR41A-16-19

Esta muestra fue extraída en la localidad de Chulpapalca (UTM: 402721, 8035929), correspondiente a una lava andesítica. En esta sección delgada se observa un “*Splaying conjugado*” (Fossen, 2010) con lo cual se deduce que esfuerzos diferenciales de tensión coexisten con microfallas de rumbo dextral (Fig. 119); este modelo puede aplicarse a fallas locales, incluso regionales (Gumiel et al., 1996). (Ver Anexo N°1, M-4).

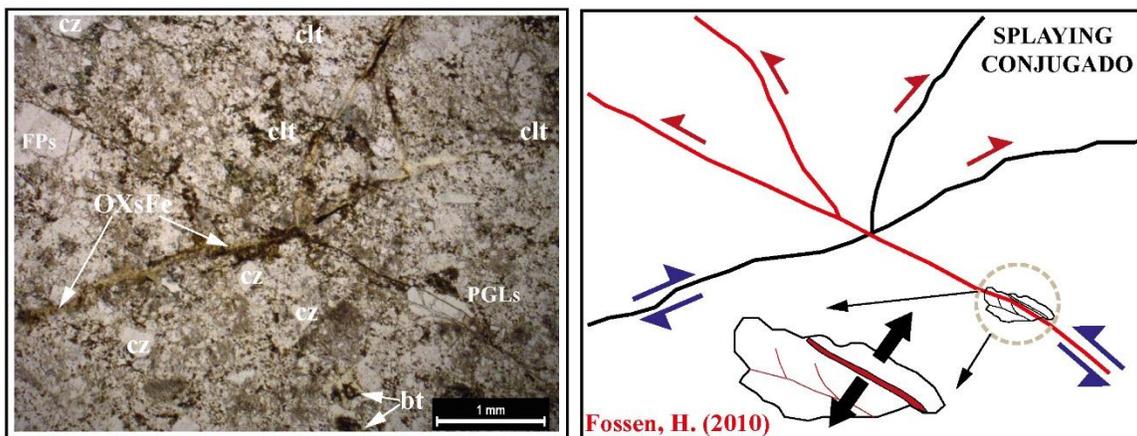


Figura 119: *Splaying Conjugado* en la muestra GR41A-16-19.

MUESTRA N°5: GR41A-16-36

Esta muestra fue extraída al SO de Ataspaca (UTM: 402224, 8039366), en contacto fallado entre el Batolito Challaviento con la Formación Socosani (generando Mármol). La microestructura referente a este punto es una zona de cizalla (Fig. 120) desplazando fracturas rellenas de carbonatos (aparentemente la microestructura se observa como un horts) (Ver Anexo N°1, M-5).

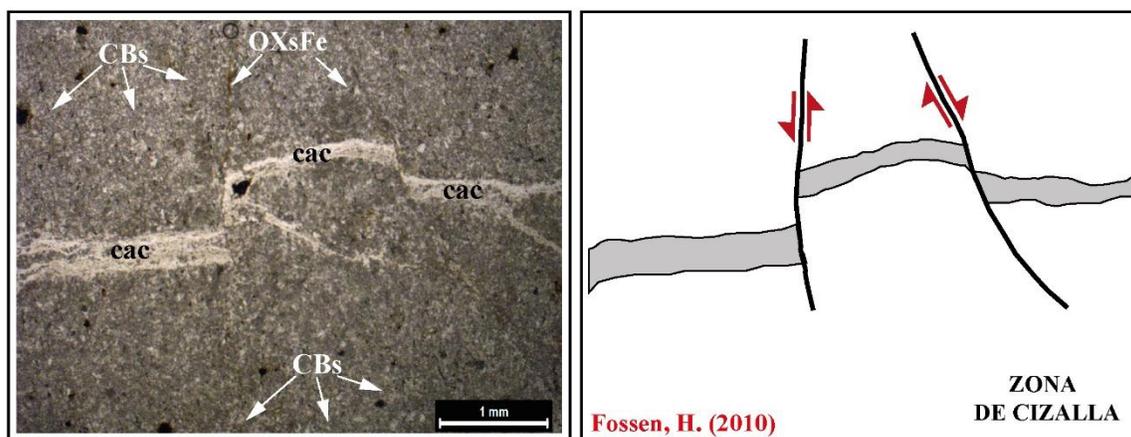


Figura 120: Zonas de cizalla en la muestra GR41A-16-36.

MUESTRA N°6: GR41A-16-37

Esta muestra fue extraída al SO de Ataspaca (UTM: 402224, 8039366), en contacto fallado entre el Batolito Challaviento con la Formación Socosani (generando Skarn Calcosilicatado). No hay evidencias de microestructuras de carácter tectónico, se observan foliaciones, clivaje y un enjambre (Fig. 121) de fracturas en reja con óxidos de hierro (OXsFe) (Ver Anexo N°1, M-6).

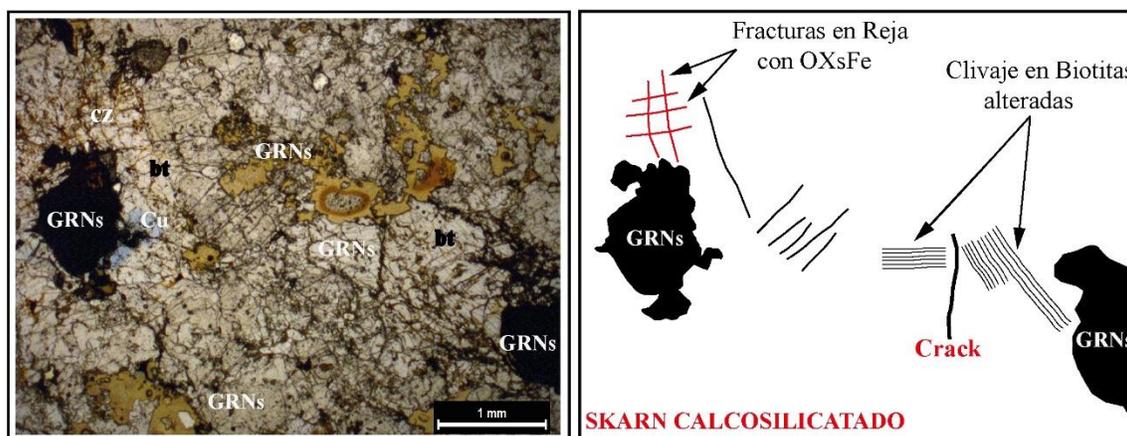


Figura 121: Fracturas en reja y clivaje de biotitas en la muestra GR41A-16-37.

MUESTRA N°7: GR41A-16-45

Esta muestra fue extraída del sector sur de Mal Paso (UTM: 387692, 8053488), en un plano de falla cercano a la Falla Caplina (perteneciente al SFI).

Esta muestra rompe algunos paradigmas acerca de lo que se conocía como Unidad Milonita, con esta sección delgada se da a conocer que esta Unidad no solo está constituida por Milonitas (Monge & Cervantes., 2000), sino que en las zonas distales a la Falla Incapuquio encontramos incluso abundante craquelamiento y Brechamiento.

Esta muestra de acuerdo a sus características corresponde a una Pseudotaquillita (Fig. 122), que es el registro de una falla de origen frágil-dúctil (transición) que pertenece al grupo de las cataclastitas (Trouw & Passchier., 2010), y está íntimamente relacionada a la actividad de la Falla Incapuquio. (Ver Anexo N°1, M-7).

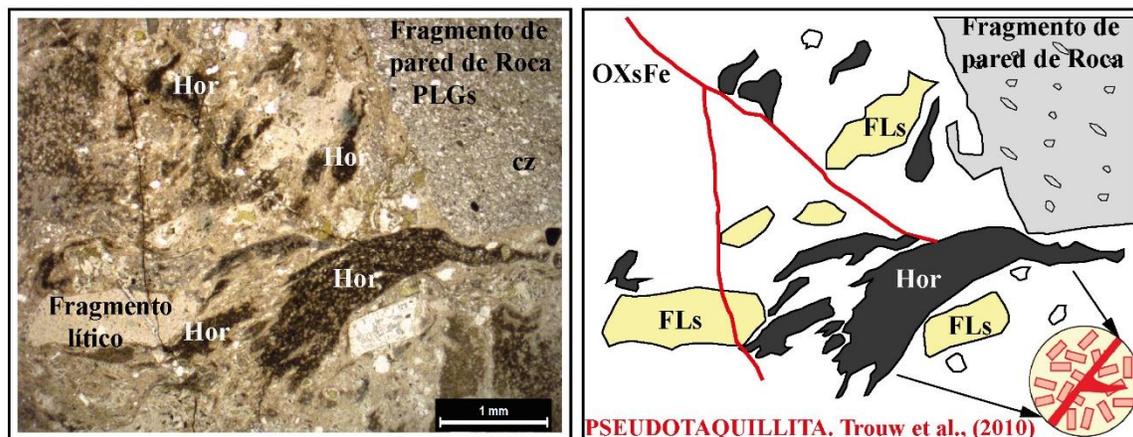


Figura 122: Pseudotaquillitas en la muestra GR41A-16-45.

MUESTRA N°8: GR41A-16-46

Esta muestra fue extraída de la Quebrada Teninguirre, al norte de Mal Paso (UTM: 387692, 8053488). Esta muestra corresponde a una brecha volcánica que presenta microestructuras tipo “Boudinage” (Fig. 123) que son asociadas a esfuerzos compresivos (Fossen, 2010), además esta muestra se ha tomado en un punto cercano a la Falla Incapuquio (carácter inverso con rumbo sinistral). (Ver Anexo N°1, M-8).

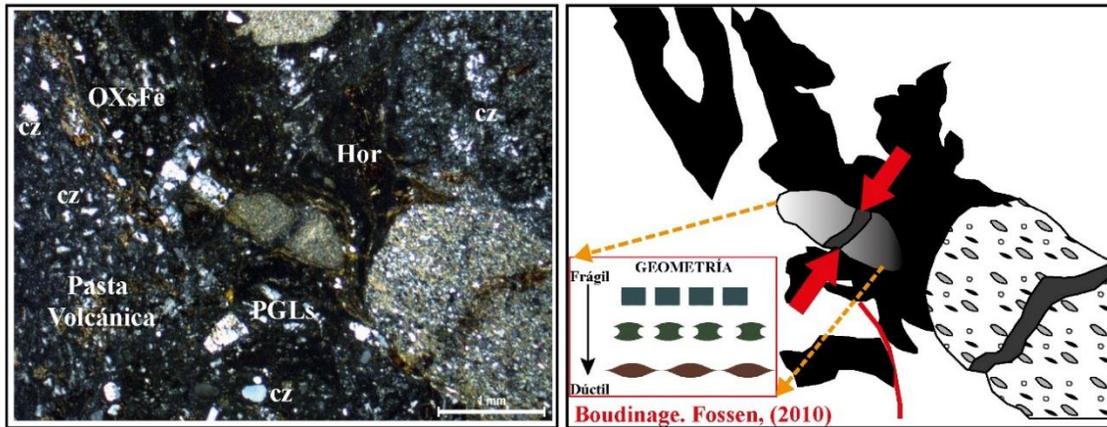


Figura 123: Boudinage en la muestra GR41A-16-46.

MUESTRA N°9: GR41A-16-47

Esta muestra ha sido extraída de la Quebrada Teninguirre, al norte de Mal Paso (UTM: 387692, 8053488). Esta muestra corresponde a una lava volcánica silicificada y presenta Estilolitas (Fig. 124), que son microestructuras parecidas a suturas (Passchier & Trouw., 2005), que muestran una superficie irregular muy fina, y está íntimamente ligado a regímenes compresivos, esto representa una evidencia más del comportamiento de la Falla Incapuquio. (Ver Anexo N°1, M-9).

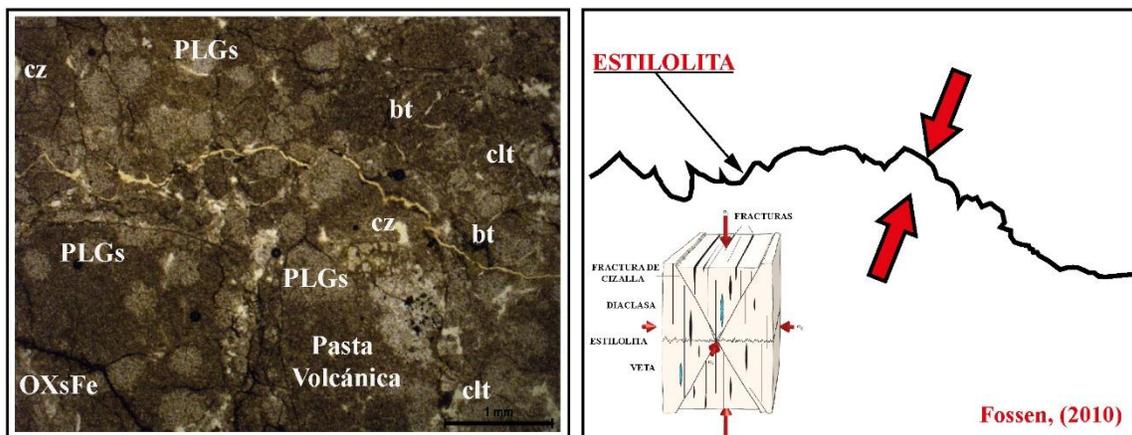


Figura 124: Estilolitas en la muestra GR41A-16-47.

MUESTRA N°10: GR41A-16-48

Esta muestra ha sido extraída de Mal Paso (UTM: 387487, 8052421). En esta sección delgada se aprecia el típico “Punto triple” que se atribuye a algunas rocas metamórficas.

Posemos observar recristalización y bandeamiento de los cristales de cuarzo y plagioclasas del Gneis (Fig. 125), además un alineamiento de micas. (Ver Anexo N°1, M-10).

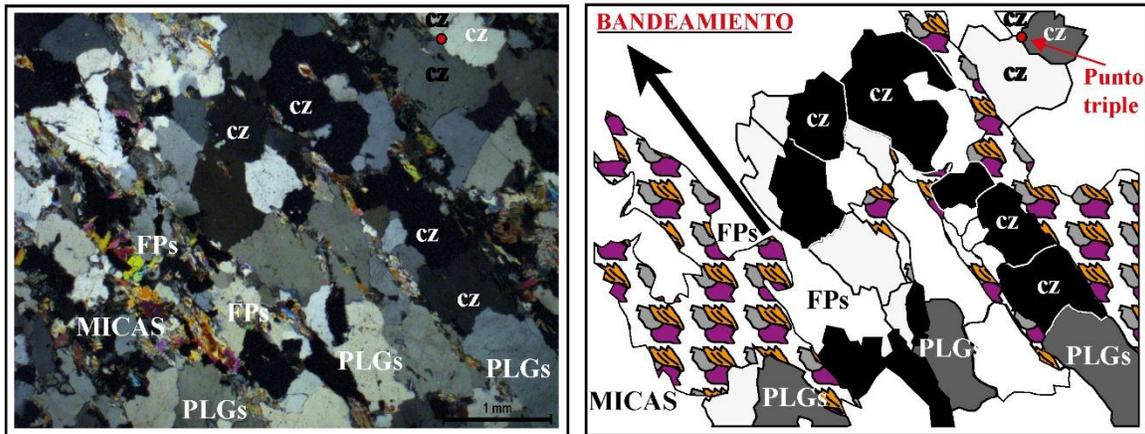


Figura 125: Bandeamiento de cristales de cuarzo en la muestra GR41A-16-48.

MUESTRA N°11: GR41A-16-49

Esta muestra ha sido extraída de Mal Paso (UTM: 387447, 8052048). En esta sección delgada no se evidencia microestructuras de carácter tectónico, sino se aprecia maclas polisintéticas en plagioclasas (Fig. 126), y un clivaje enrejado característico de la muscovita, asociado a óxidos de hierro y minerales opacos (metálicos generalmente, vistos en nicoles cruzados) (Ver Anexo N°1, M-11).

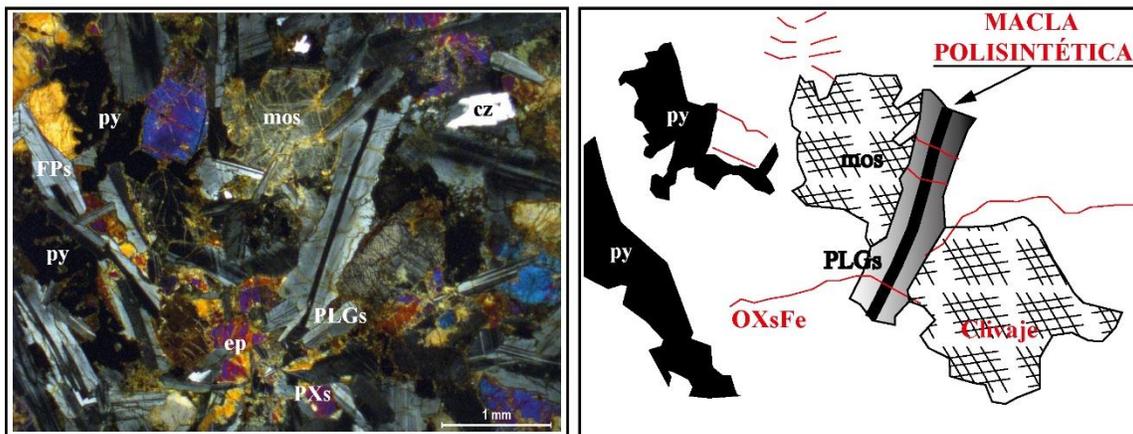


Figura 126: Macla polisintética en plagioclasas de la muestra GR41A-16-49.

MUESTRA N°12: GR41A-16-50

Esta muestra fue extraída del Complejo Basal de la Costa, en Huacano Chico (UTM: 387393, 8051488). Se observa deformación dúctil, y la evidencia es la recrystalización y bandeamiento de los cristales del Gneis (Fig. 127). Extraída de un plano de falla perteneciente al Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), esta microestructura nos indicaría la intensidad de la falla, capaz de recrystalizar cristales de cuarzo. (Ver Anexo N°1, M-12).

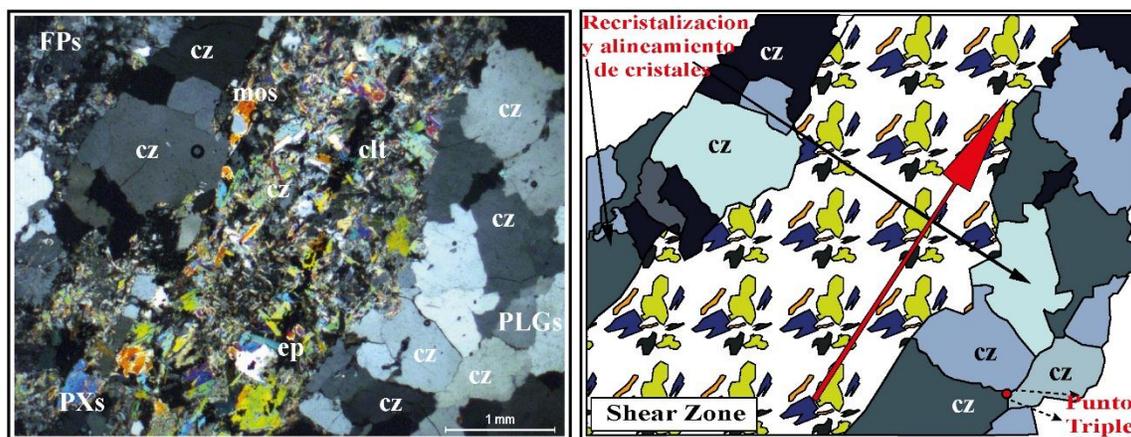


Figura 127: Recrystalización y bandeamiento de cristales en la muestra GR41A-16-50.

MUESTRA N°13: GR41A-16-61

Esta muestra ha sido extraída en el sector SO de Huacano Chico (UTM: 386466, 8049398). Se observa un Gneis que posee microestructuras tipo "Mica Fish" (Trouw & Passchier., 2009) de carácter dúctil (Fig. 128) y representan evidencias de una zona de Cizalla generalmente desarrollada dentro de porfidoblastos, que son indicadores del movimiento de cizalla. (Ver Anexo N°1, M-13).

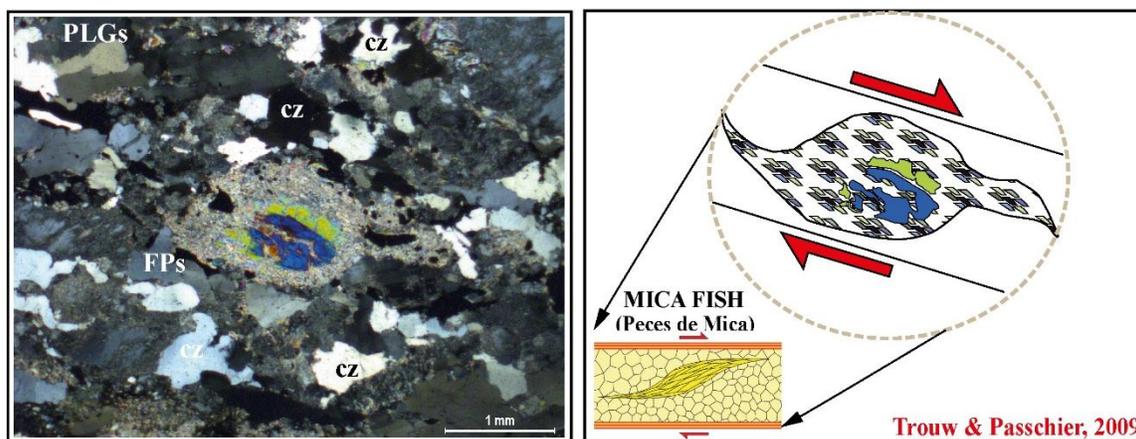


Figura 128: Microestructuras tipo "Mica Fish" en la muestra GR41A-16-61.

MUESTRA N°14: GR41A-16-62

Esta muestra ha sido extraída de un plano de falla cercano a la Unidad Milonita en el sector de Huacano Señal (UTM: 384826, 8045035). En la sección delgada se observa los cristales euhedrales de plagioclasas que presentan maclas polisintéticas, y lo más resaltante son las fracturas anastomasadas (Fig. 129) que representan saltos en los esfuerzos distensivos (relacionado a zonas de apertura). (Ver Anexo N°1, M-14).

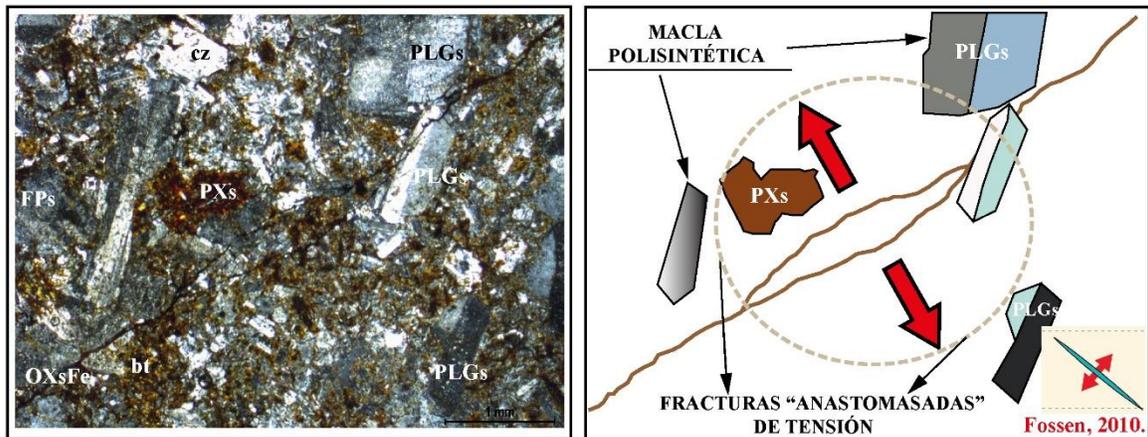


Figura 129: Fracturas anastomasadas en la muestra GR41A-16-62.

MUESTRA N°15: GR41A-16-81

Esta muestra ha sido extraída del sector NE de Calientes, en la Quebrada Tocuco (UTM: 382662, 8026238). Corresponde a areniscas ferruginosas de la Formación Hualhuani. En la sección delgada se muestra fracturas de tensión (Fig. 130), que es coherente con gran cantidad de fallas normales de alto ángulo y paralelas a la estratificación, encontradas en la Quebrada Tocuco. (Ver Anexo N°1, M-15).

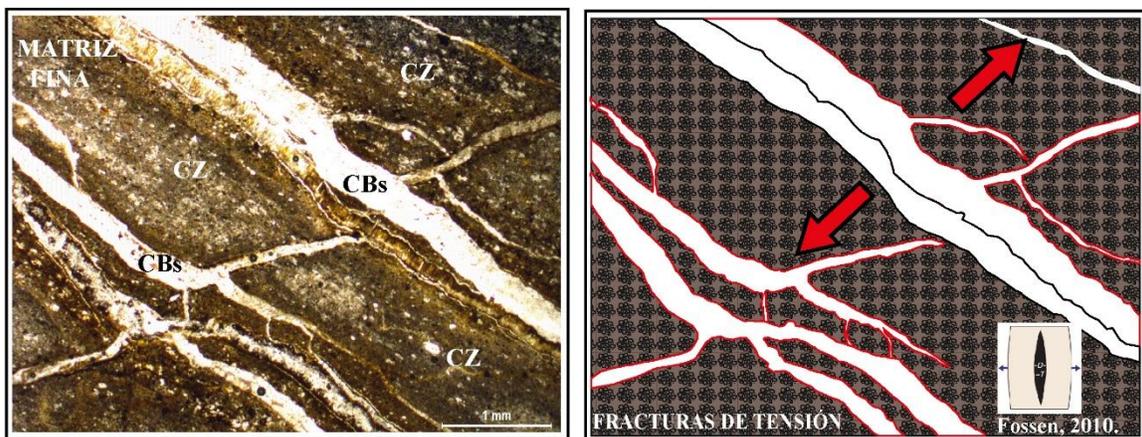


Figura 130: Fracturas de tensión en la muestra GR41A-16-81.

MUESTRA N°16: GR41A-16-83

Esta muestra ha sido extraída del sector NE de Calientes (UTM: 382200, 8025407). Esta muestra corresponde a brechas tectónicas o cataclastitas (Fig. 131) determinados por el patrón de ordenamiento de clastos (heterogéneos y angulosos), la morfología de los clastos quebrados son indicadores de la intensidad de fallamiento, lo que limita a interpretar que estos clastos presenten un patrón direccional. (Ver Anexo N°1, M-16).

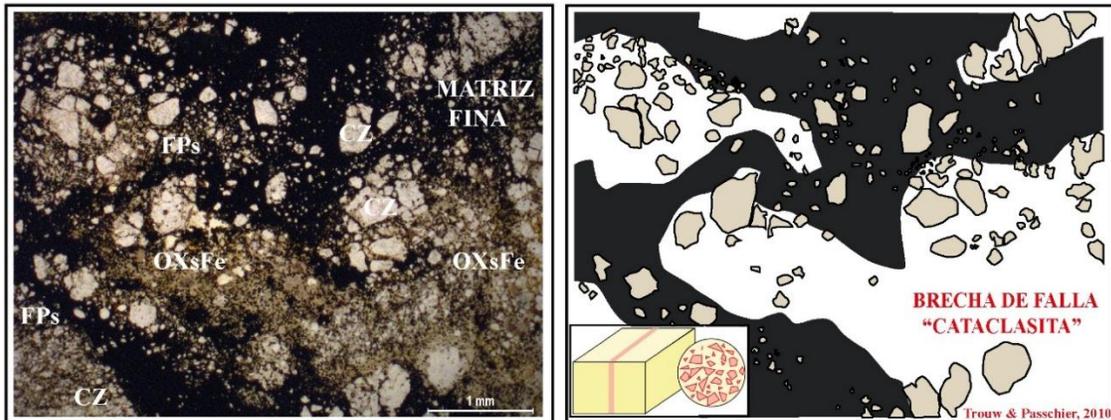


Figura 131: Cataclastitas en la muestra GR41A-16-83.

MUESTRA N°17: GR41A-16-85

Esta muestra ha sido extraída del sector NE de Calientes, en la Quebrada Tocuco (UTM: 382163, 8026398). Esta muestra corresponde a una meta-arenisca, ya que presenta un metamorfismo parcial, se aprecia zonas de recristalización y bandeamiento de cristales (Fig. 132), incluso se puede observar el punto triple característico de los cristales de cuarzo (formando un ángulo de 120° aproximadamente entre sus caras). (Ver Anexo N°1, M-17).

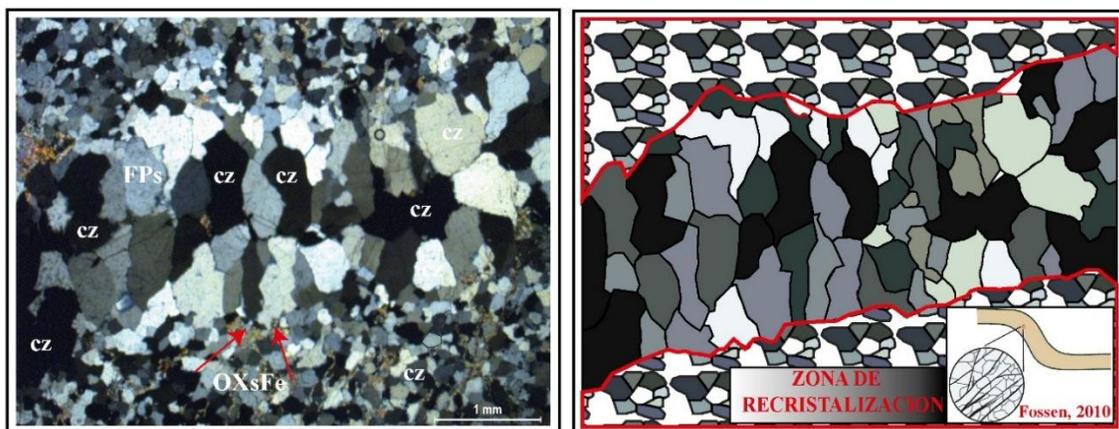


Figura 132: Zona de recristalización en la muestra GR41A-16-85.

4.4.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El área de Pachía – Palca, se encuentra dominada por fallas de orientación preferentemente NO-SE (orientación típica Andina), y algunos complementarios en sentido NE-SO, E-O, este sistema obedece a un complejo de compatibilidad geométrica cuyos regímenes de esfuerzos son compresivos de rumbo, adaptándose perfectamente al estilo estructural “Strike-Slip” (sistemas estructurales de rumbo, cf. McClay & Bonora, 2001) los cuales han sido susceptibles a cambios durante el Mesozoico del sur de Perú (Ver Anexo N° 4).

Las estrías de fallas estudiadas y analizadas por lo general registran la información del último movimiento cinemático que sufrió una falla. Es necesario saber que bajo un determinado campo de esfuerzos, no todas las fallas preexistentes logran moverse, esto debido a la magnitud de los movimientos tectónicos, por lo que se mueven solo aquellas estructuras que alcancen el umbral de reactivación, además es de gran importancia comprender que la falla regional Incapuquio es el producto de sucesivas reactivaciones de ésta a lo largo del tiempo geológico y evolución tectónica de la Cuenca Arequipa.

Las fallas que afectan a las rocas más jóvenes (Cretácico superior - Paleógeno), corresponden al Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), y es adecuado afirmar que los desplazamientos que estas estructuras han experimentado, tendrían que encontrarse en las rocas más antiguas también (i.e. Mesozoico). Se ha encontrado evidencias de direcciones de esfuerzos que no están presentes en el SFI, los cuales no se han considerado para este análisis porque estamos ante la presencia de estructuras que no lograron alcanzar el punto de reactivación y por consiguiente guardan información de eventos aún más antiguos (pre-Jurásico).

Para esta investigación se ha tomado un total de 38 Estaciones Microtectónicas (EM) (Tabla 81), donde se contempla el número de estación (N° EM), las coordenadas (X, Y), el número de estrías que posee cada EM, los parámetros vectoriales de los esfuerzos promedio de cada estación, y el régimen dominante de acuerdo a la clasificación de Anderson, (1951) para fallas la dirección de los ejes de deformación, obtenidos del estudio de cada estación.

El criterio en consideración para esta investigación propone agrupar de manera sistemática. Los esfuerzos resultantes de la agrupación son cinco, en base a su dirección y compatibilidad geométrica (McClay & Bonora, 2001), de los cuales los tres primeros eventos corresponden a todo el Jurásico, incluyendo el Cretácico Inferior y los últimos dos

eventos corresponden al Ciclo Andino, donde ocurre una inversión tectónica durante el Coniaciano-Santoniano (83.6-89.8 Ma).

Tabla 81: Resumen de estaciones microtectónicas (EM) y parámetros vectoriales de los esfuerzos.

N° EM	COORD_X	COORD_Y	N° ESTRÍAS	SIGMA 1	SIGMA 2	SIGMA 3	RÉGIMEN
EM-1	402352	8034997	9	238.8	338.8	144	TRANSFORMANTE
EM-2	403706	8033232	3	82.9	257.1	349.2	DISTENSIVO
EM-3	400936	8035794	2	240	136.3	335.5	TRANSFORMANTE
EM-4	400488	8036252	6	79.8	172.5	338.6	COMPRESIVO
EM-5	400704	8039224	3	26.6	296.6	206.3	COMPRESIVO
EM-6	400945	8037398	3	12	132.9	235.2	DISTENSIVO
EM-7	387692	8053488	3	273.5	9.2	116.8	COMPRESIVO
EM-8	387455	8052396	6	194.2	287.7	88.5	COMPRESIVO
EM-9	383127	8026055	3	63.9	306.8	158.9	TRANSFORMANTE
EM-10	382662	8026238	5	318.7	208.4	108.9	DISTENSIVO
EM-11	382638	8026477	2	21.5	282.8	135.6	COMPRESIVO
EM-12	382200	8026407	2	85.7	215.8	321.6	DISTENSIVO
EM-13	387058	8034734	4	257	160.8	348.9	TRANSFORMANTE
EM-14	404778	8033225	4	253.6	345.2	124.8	COMPRESIVO
EM-15	397813	8033302	4	194.5	101.3	302.1	COMPRESIVO
EM-16	401101	8027209	5	73	172.2	336	TRANSFORMANTE
EM-17	399180	8035967	5	182.6	273.2	92.1	TRANSFORMANTE
EM-18	403320	8031271	4	110.3	14.5	200.6	TRANSFORMANTE
EM-19	399757	8048306	4	110	1.8	269.1	DISTENSIVO
EM-20	389218	8048539	3	99.5	208.3	4.1	TRANSFORMANTE
EM-21	386781	8047306	6	342.2	56	157.7	COMPRESIVO
EM-22	387616	8047376	5	269.7	65.8	171.1	TRANSFORMANTE
EM-23	388149	8053897	5	100.2	298.4	191.1	TRANSFORMANTE
EM-24	387794	8053600	5	44.8	224.7	314.8	TRANSFORMANTE
EM-25	382165	8026395	4	182.9	61.5	329.4	DISTENSIVO
EM-26	382242	8026385	4	317.7	49.7	159.5	COMPRESIVO
EM-27	382191	8026397	4	323.6	68.2	165.1	DISTENSIVO
EM-28	382372	8026484	4	123.5	325.3	214.7	TRANSFORMANTE
EM-29	383156	8026095	4	272.5	29.2	164	TRANSFORMANTE
EM-30	382361	8026523	4	129.8	305.2	39.7	TRANSFORMANTE
EM-31	382322	8026404	4	338.5	240.3	133.4	COMPRESIVO
EM-32	390746	8057967	4	161.3	3.1	253.9	TRANSFORMANTE
EM-33	390498	8056972	4	117.4	229.5	13.1	TRANSFORMANTE
EM-34	390188	8055696	4	99.7	197.5	293.1	DISTENSIVO
EM-35	387186	8053199	4	189	89.1	279.2	TRANSFORMANTE
EM-36	385761	8053278	5	328.9	87.8	226.1	TRANSFORMANTE
EM-37	385757	8053216	3	205.3	318.1	109.9	TRANSFORMANTE
EM-38	387417	8053009	3	112.1	205.5	352.4	COMPRESIVO

Donde:

Sigma 1 (σ_1): Esfuerzo principal mayor.

Sigma 2 (σ_2): Esfuerzo principal intermedio.

Sigma 3 (σ_3): Esfuerzo principal menor.

El análisis de las estaciones de microtectónica (EM), ha definido la dirección de paleoesfuerzos que han afectado a la evolución de la Cuenca Arequipa diferenciado en eventos (Tabla 82), desde los inicios del Jurásico inferior hasta la transición Cretácico superior – Paleógeno; correspondiendo a un primer evento distensivo (responsable de la creación del espacio de acomodación de la Cuenca Arequipa en Tacna) en el Sinemuriano (190.8 – 199.3 Ma, Jurásico inferior).

Tabla 82: Eventos tectónicos regionales responsables de la evolución de la Cuenca Arequipa.

EVENTO	N° EM	COORD X	COORD Y	N° ESTRÍAS	SIGMA 1	SIGMA 2	SIGMA 3	RÉGIMEN
PRIMER EVENTO	EM-6	400945	8037398	3	12	132.9	235.2	DISTENSIVO
	EM-11	382638	8026477	2	21.5	282.8	135.6	COMPRESIVO
	EM-5	400704	8039224	3	26.6	296.6	206.3	COMPRESIVO
	EM-24	387794	8053600	5	44.8	224.7	314.8	TRANSFORMANTE
SEGUNDO EVENTO	EM-9	383127	8026055	3	63.9	306.8	158.9	TRANSFORMANTE
	EM-16	401101	8027209	5	73	172.2	336	TRANSFORMANTE
	EM-4	400488	8036252	6	79.8	172.5	338.6	COMPRESIVO
	EM-2	403706	8033232	3	82.9	257.1	349.2	DISTENSIVO
	EM-12	382200	8026407	2	85.7	215.8	321.6	DISTENSIVO
	EM-20	389218	8048539	3	99.5	208.3	4.1	TRANSFORMANTE
	EM-34	390188	8055696	4	99.7	197.5	293.1	DISTENSIVO
	EM-23	388149	8053897	5	100.2	298.4	191.1	TRANSFORMANTE
	EM-19	399757	8048306	4	110	1.8	269.1	DISTENSIVO
	EM-18	403320	8031271	4	110.3	14.5	200.6	TRANSFORMANTE
	EM-38	387417	8053009	3	112.1	205.5	352.4	COMPRESIVO
	EM-33	390498	8056972	4	117.4	229.5	13.1	TRANSFORMANTE
	EM-28	382372	8026484	4	123.5	325.3	214.7	TRANSFORMANTE
	EM-30	382361	8026523	4	129.8	305.2	39.7	TRANSFORMANTE
TERCER EVENTO	EM-32	390746	8057967	4	161.3	3.1	253.9	TRANSFORMANTE
	EM-17	399180	8035967	5	182.6	273.2	92.1	TRANSFORMANTE
	EM-25	382165	8026395	4	182.9	61.5	329.4	DISTENSIVO
	EM-35	387186	8053199	4	189	89.1	279.2	TRANSFORMANTE
	EM-8	387455	8052396	6	194.2	287.7	88.5	COMPRESIVO
	EM-15	397813	8033302	4	194.5	101.3	302.1	COMPRESIVO
	EM-37	385757	8053216	3	205.3	318.1	109.9	TRANSFORMANTE
	EM-1	402352	8034997	9	238.8	338.8	144	TRANSFORMANTE
CUARTO EVENTO	EM-26	382242	8026385	4	317.7	49.7	159.5	COMPRESIVO
	EM-10	382662	8026238	5	318.7	208.4	108.9	DISTENSIVO
	EM-27	382191	8026397	4	323.6	68.2	165.1	DISTENSIVO
	EM-36	385761	8053278	5	328.9	87.8	226.1	TRANSFORMANTE
	EM-31	382322	8026404	4	338.5	240.3	133.4	COMPRESIVO
	EM-21	386781	8047306	6	342.2	56	157.7	COMPRESIVO
QUINTO EVENTO	EM-3	400936	8035794	2	240	136.3	335.5	TRANSFORMANTE
	EM-14	404778	8033225	4	253.6	345.2	124.8	COMPRESIVO
	EM-13	387058	8034734	4	257	160.8	348.9	TRANSFORMANTE
	EM-22	387616	8047376	5	269.7	65.8	171.1	TRANSFORMANTE
	EM-29	383156	8026095	4	272.5	29.2	164	TRANSFORMANTE
	EM-7	387692	8053488	3	273.5	9.2	116.8	COMPRESIVO

4.4.1. PRIMERO EVENTO: ESFUERZO DISTENSIVO NO-SE (JURÁSICO INFERIOR – JURÁSICO MEDIO)

Este esfuerzo ha sido definido a partir de las estructuras asociadas al SFI y representan es la integración de los datos provistos en las estaciones 5, 6, 11 y 24 (Fig. 133). El resultado de la agrupación de éstas estaciones microtectónicas (EMs) da como resultado un esfuerzo distensivo (σ_3) con dirección 124.9 ° (NO-SE), como se indica en la tabla de parámetros direccionales (Tabla 83).

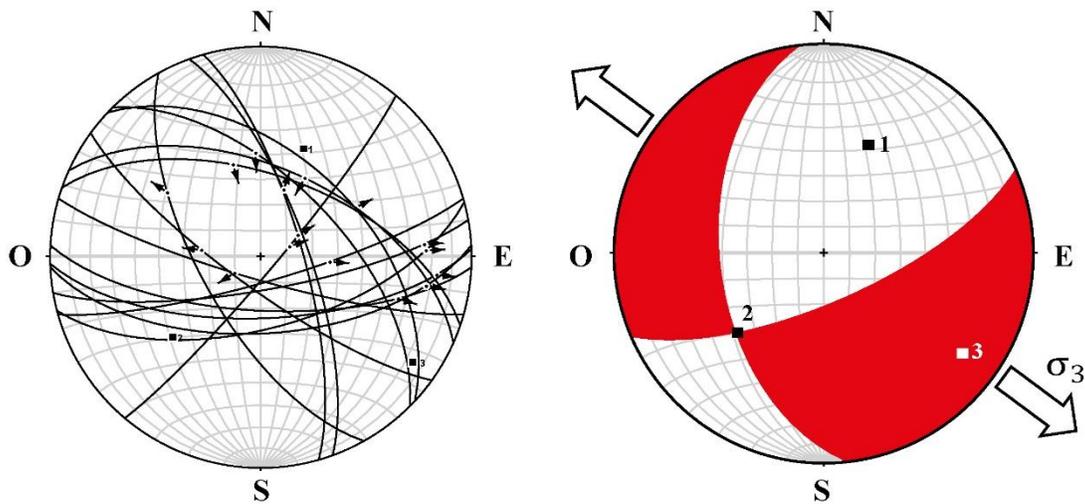


Figura 133: Agrupación de las estaciones 5, 6, 11 y 24. En la figura de la izquierda se representa la gráfica de los planos de falla, estrías y los ejes de máxima compresión (σ_1), intermedia (σ_2) y mínima (σ_3); a la derecha, representación estadística de los diedros rectos (en rojo los diedros que se encuentran en tensión y en blanco los diedros que se encuentran en compresión), 1 y 3 son los ejes de compresión y extensión respectivamente.

Tabla 83: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al primer evento tectónico regional (distensión NO-SE).

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2627	21.4 °	44.2 °	VERTICAL	DISTENSIVO
σ_2	0.0620	227.7 °	42.7 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.2007	124.9 °	13.5 °	HORIZONTAL	

De acuerdo a Carlotto et al. (2009), en el sur del Perú los movimientos tectónicos de extensión ocurridas durante el Jurásico dieron inicio a la creación de la Cuenca Occidental Peruana o Cuenca Arequipa, donde se han evidenciado paleoesfuerzos en el Cerro Junerata,

y se puede afirmar que desde ese entonces las rocas de la Formación Chocolate se encontraban en pleno levantamiento. Según Trinidad (2017), estas rocas ya estaban exhumadas (aunque posiblemente de modo parcial) desde el Jurásico medio, como lo demuestra los espectros de minerales pesados en sedimentos de la Formación Socosani. Esta distensión NO-SE es la responsable de la apertura de la Cuenca Arequipa y relacionada inicialmente con el Sistema de Fallas Incapuquio (para esta edad funcionaban como fallas normales según Acosta et al, 2010). Estas fallas debieron controlar la sedimentación de la Formación Pelado (Sinemuriano-Pliensbachiano, \pm 190.8 Ma), los cuales se dieron de manera de extensas plataformas carbonatadas (Salinas, 1983; J. Quispe, 2017).

La dirección del esfuerzo distensivo (Σ_3) es N 124.9 °. No hay trabajos anteriores disponibles que hayan calculado dirección de paleoesfuerzos, pero si registran fallas normales que controlan la sedimentación jurásica hasta el Pliensbachiano, bajo este campo de esfuerzos se asocian fallas inversas de rumbo aproximado N 50 mientras que fallas normales y fracturas tensionales tendrían una orientación general NO-SE, lo cual se encuentra dentro de un contexto de adelgazamiento litosférico (Sempere et al., 2004). En esta parte de la cuenca se desarrolló una actividad volcano-sedimentaria (Pino, 2003; Wittmann, 2001).

4.4.2. SEGUNDO EVENTO: TRANSTENSIÓN N-S (BAJOCIANO-BATHONIANO)

Estos esfuerzos están asociados al SFI y es la agrupación de las estaciones microtectónicas 2, 4, 9, 12, 16, 18, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 38 (Fig. 134); el resultado de la interacción de estas EMs corresponden a un evento transtensivo, y está relacionado a la evolución del Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), que para esta edad aún eran dominadas por un régimen distensivo, esto lo evidencia los valores direccionales de sus esfuerzos (Tabla 84).

En el Cerro Tocuco y en el Cerro Palquilla, se tiene bien documentado extensos y potentes apilamientos de rocas carbonatadas intercaladas con lutitas y limolitas, las cuales tienen recurrentes hallazgos de ammonites bajocianos y bathonianos (Benites, 2017). Dado que el cartografiado geológico exime de fallas “horizontales” que hagan “repetir” o “duplicar” estratos, nos hace de inmediato deducir que la subsidencia ha sido muy importante en este

sitio y en este tiempo dado, lo cual se resume que la acumulación sedimentaria en este tiempo está muy asociada con los pulsos de transtensión y de apertura drástica de cuenca que son interpretados en esta sección.

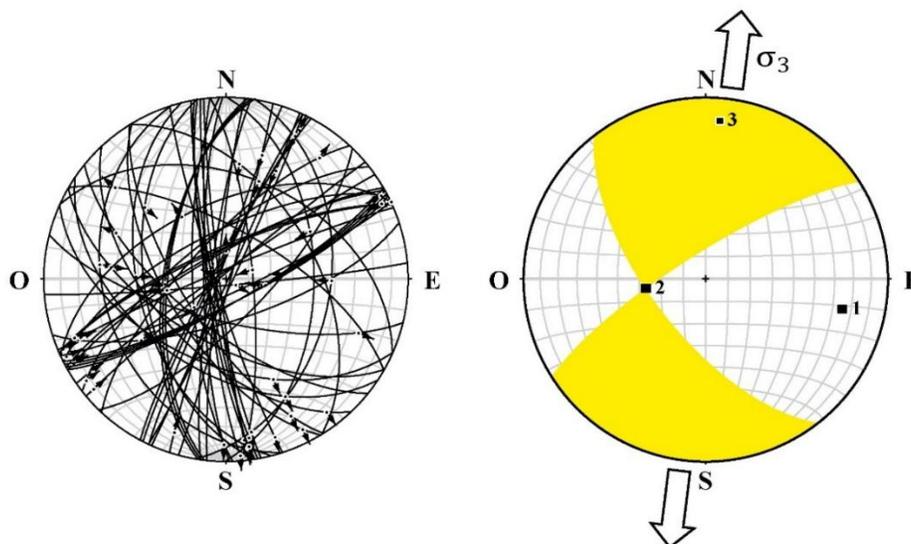


Figura 134: Agrupación de las estaciones microtectónicas 2, 4, 9, 12, 16, 18, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 38; que dan como resultante un evento transtensivo.

Tabla 84: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al segundo evento tectónico regional (Transtensión N-S).

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2750	102.3 °	25.8 °	HORIZONTAL	TRANSCURRENTE
σ_2	0.0765	260.7 °	62.5 °	VERTICAL	
σ_3	0.1985	8.0 °	8.8 °	HORIZONTAL	

Este evento pone en evidencia la variación del régimen que dominaba la Cuenca Arequipa, que en sus inicios fue netamente distensivo (Vicente et al., 1982), para el Jurásico Medio (Bajociano – Bathoniano, 166.1 – 170.3 Ma) el régimen dominante fue transtensivo (Jaillard et al., 2000), esto lo demuestra los datos tomados en el sector NE de Palca, donde se observa notablemente la Falla Junerata que corta a los sedimentos calcáreos de la Formación Pelado, al norte del Cerro Pulaca se registra fallas inversas que afectan la formación Socosani (relacionadas a la transtensión N-S).

La dirección del esfuerzo es cuasi-coincidente con la dirección N-S (N 8°), generando así una compresión N 102.3° que generan fallas inversas NNE-SSO. Por lo tanto paleogeográficamente se registra un levantamiento de la zona comprendida por la

Cordillera de la Costa (Acosta et al., 2010); y el SFI aún sigue funcionando como un sistema de fallas normales.

4.4.3. TERCER EVENTO: TRANSTENSIÓN E-O (JURÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO INFERIOR)

Para caracterizar microestructuralmente este evento tectónico, se han integrado 8 estaciones microtectónicas (EM-1, 8, 15, 17, 25, 32, 35, 37) (Fig. 135) de acuerdo a la compatibilidad geométrica de fallas (McClay & Bonora., 2001). Según Vicente et al. (1982), la Cuenca Arequipa ha sido controlada por regímenes extensivos durante el Jurásico y afirma además que la extensión sigue hasta el Cretácico superior. Por otro lado, este evento tectónico está íntimamente relacionado con el magmatismo basáltico calco-alcalino del arco Rio Grande (170 – 130 Ma) (Mamani et al. 2010), los cuales serían consistentes con un posible régimen extensional. Las evidencias están registradas al NO del Cerro Condorine, son coherente con la cinemática de la Falla Palca.

Para estas edades el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) aún poseen un comportamiento transcurrente (con predominancia distensivo) y controla la sedimentación clástica de la Cuenca Arequipa con la depositación del Grupo Yura, coetáneamente se forman algunos *slumps* característicos de la Formación Cachíos (estructuras sinsedimentarias), plegamientos en areniscas de la Formación Hualhuani, y fallas normales de alto ángulo paralelas a la estratificación en el Cerro Tocuco. El esfuerzo distensivo tiene una dirección N 96° y una compresión N 192° (Tabla 85), los cuales están enmarcados dentro de un sistema transtensivo y obedece al modelo de Riedel.

Este episodio puede ser comparado en tiempo con etapas de enfriamiento y levantamiento, como lo reportan las edades de trazas de fisión en zircones 107 Ma y 133 Ma en el departamento de Tacna (Wipf, 2006). Estas dataciones se han realizado en rocas del Batolito de la Costa y revelan que el enfriamiento de este bloque que ha sido rápido y drástico, siendo consistente hasta al menos mediados del Cretácico superior (Fase Peruana). De acuerdo a estas evidencias, se puede asumir que el levantamiento y posible exhumación de estas rocas se ha dado por fallas normales y por un pulso drástico de expansión de cuenca, junto con expulsión de rocas máficas a lo largo de la Costa sur Peruana.

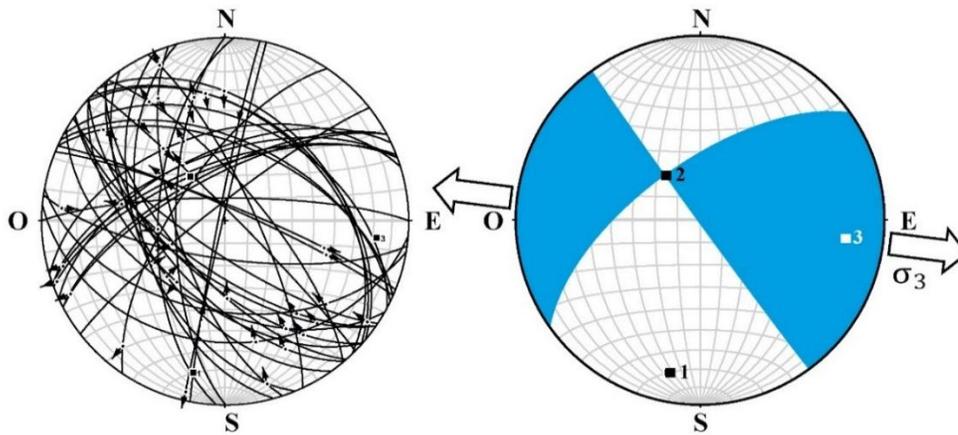


Figura 135: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 1, 8, 15, 17, 25, 32, 35, 37, que dan en promedio un régimen transtensivo.

Tabla 85: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al tercer evento tectónico regional (transtensión E-O).

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.2031	192.0 °	16.6 °	HORIZONTAL	TRANSCURRENTE
σ_2	0.0704	321.5 °	64.9 °	VERTICAL	
σ_3	0.1327	96.4 °	18.3 °	HORIZONTAL	

4.4.4. CUARTO EVENTO: COMPRESIÓN NO-SE (CRETÁCICO INFERIOR – CRETÁCICO SUPERIOR)

Para este evento se han integrado los datos provenientes de 6 estaciones microtectónicas (EM-10, 21, 26, 27, 31, 36) (Fig. 136) las cuales han sido analizadas de acuerdo al criterio de compatibilidad geométrica para fallas (McClay & Bonora., 2001).

Este evento marca precedentes, debido a que para esta edad se da la inversión tectónica que exhuma los bloques antiguos (Alván, 2015; Pino, 2003; Jacay, 2004) como los son por ejemplo, el Complejo Basal de la Costa, que aflora en el sector de Huacano Chico y al norte de Mal Paso, además la magnitud de compresión es tal que logra hacer que aflore rocas del Grupo Cabanillas y Grupo ambo (de edades devónico y carbonífero correspondientemente) (Martínez, 2005), y más hacia el noroeste, las rocas del Batolito de la Costa (Mamani et al., 2010).

Durante el intervalo Coniaciano – Santoniano (83.6 – 89.8 Ma) ocurre uno de los fenómenos más importantes de la historia tectónica del Sistema de Fallas Incapuquio, en este periodo las fallas normales que gobernaban y controlaban la Cuenca Arequipa se invierten a fallas inversas (Carlotto et al., 1998; Acosta et al., 2012).

El SFI adquiere su naturaleza inversa debido a la inversión tectónica y se relaciona con las fallas Challaviento, Junerata y Caplina, todas estas fallas con un denominador común: su dirección NO-SE.

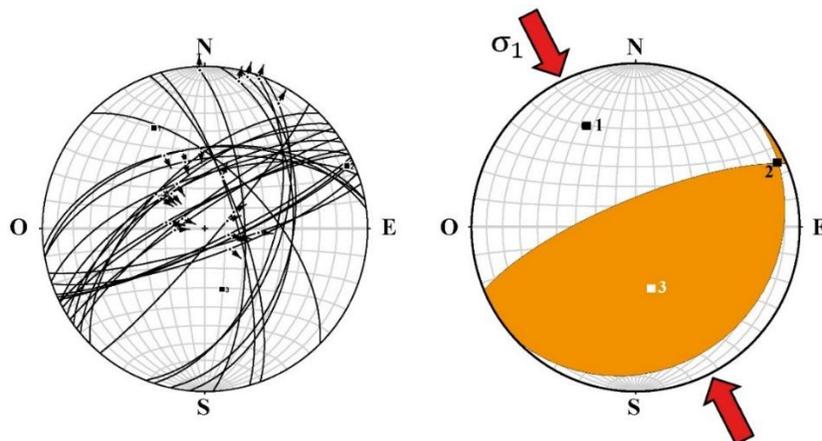


Figura 136: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 10, 21, 26, 27, 31, 36, que dan como resultado un régimen netamente compresivo.

Tabla 86: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al cuarto evento tectónico regional (Compresión NO-SE).

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3655	332.9 °	31.1 °	HORIZONTAL	COMPRESIVO
σ_2	0.0736	66.1 °	5.2 °	HORIZONTAL	
σ_3	0.2919	164.7 °	58.3 °	VERTICAL	

Esta etapa compresiva es muy comparable a la conocida como Fase tectónica Peruana, y es representativa de la mayor deformación ocurrida en los Andes Centrales (Oncken et al., 2006). Esta gran deformación puede ser esbozada o visualizada por la potente acumulación que guarda la cuenca sedimentaria cenozoica en Tacna, donde la mayoría de las facies corresponden a episodios catastróficos intercalados con eventos magmáticos ácidos tanto en el sur de Perú como en el norte de Chile (Wörner et al., 2000; Mamani et al., 2010).

4.4.5. QUINTO EVENTO: TRANSPRESIÓN NNE (CRETÁCICO SUPERIOR-PALEÓGENO)

Para este evento tectónico se han agrupado las estaciones microtectónicas 3, 7, 13, 14, 22, 29 (Fig. 137), las cuales han sido agrupadas de acuerdo a la compatibilidad vectorial de sus esfuerzos principales (Tabla 87). Posteriormente a la inversión tectónica, a partir del Maastrichtiano (66 – 72.1 Ma) el SFI a lo largo de su trayectoria adquiere movimiento inverso con componente de rumbo sinestral (Acosta et al., 2012).

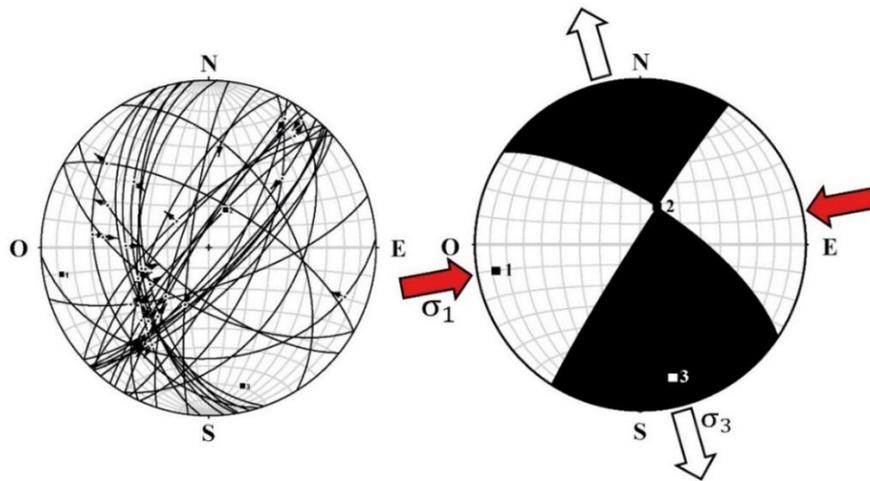


Figura 137: Agrupación de las Estaciones Microtectónicas 3, 7, 13, 14, 22, 29, que dan como resultado un régimen transcurrente.

Este régimen transcurrente actualmente domina el control estructural del SFI, la cual atraviesa los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) en dirección andina (NO-SE) la cual se evidencia desde Caricahua hasta el norte del Cerro Añache, con una longitud aproximada de 40 Km en la zona de estudios. Al norte del Cerro Machani, la Falla Incapuquio muestra su componente transcurrente (de rumbo sinestral) al desplazar sinistralmente rocas de la Unidad Milonita que afloran a lo largo de la Quebrada Tauja.

Tabla 87: Parámetros direccionales de los esfuerzos correspondientes al quinto evento tectónico regional (Transpresión NNE).

EJE	P. R	DIRECCIÓN	CABECEO	P. ANDERSON	RÉGIMEN
σ_1	0.3079	259.7 °	11.7 °	HORIZONTAL	TRANSCURRENTE
σ_2	0.1328	24.0 °	69.8 °	VERTICAL	
σ_3	0.1751	166.3 °	16.2 °	HORIZONTAL	

4.5. INTEGRACIÓN CON INFORMACIÓN SÍSMICA DEL SUBSUELO

La interpretación geológica de datos geofísicos con detalle estructural y sedimentario se ha realizado con la base de datos de líneas sísmicas del Off-shore de Tacna proporcionado por PERUPETRO (1982). Los datos utilizados para estudiar la geología estructural de la Cuenca Arequipa en Tacna han sido adquiridos formalmente de campañas sísmicas realizadas por la compañía francesa Compagnie Generale de Geophysique (CGG) de PERUPETRO en 1982, gracias al Convenio Marco entre INGEMMET y PERUPETRO, quienes usaron cañones de aire para disparar con una profundidad de fuente de 5.5 segundos (reflexión sísmica marina).

Este método fue de gran utilidad porque permitió analizar el comportamiento de las estructuras de escala regional (como lo es la Falla Caplina y demás fallas ~ NE-SO asociadas) en profundidad, aunque el contraste Onshore - Offshore (Fig. 138) no sea tan preciso por la distancia desde las líneas sísmicas hasta al área de estudios (aproximadamente entre 80 a 100 km) (Ver Anexo N° 5).

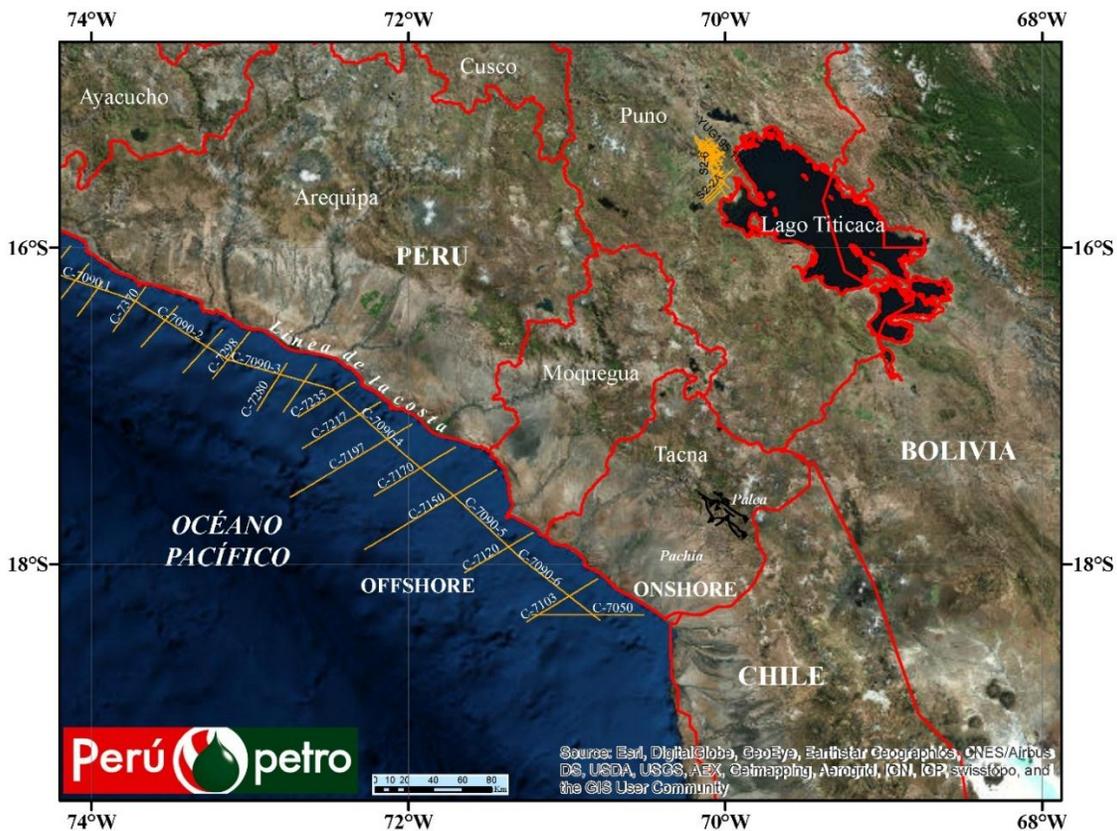


Figura 138: Mapa de líneas sísmicas del offshore de la margen sur peruana.

En el Proyecto GR41A-FONDECYT “Registros de variaciones climáticas en los sedimentos durante el mesozoico - cenozoico en el sur de Perú (sur de 17°s), y sus implicancias en el levantamiento de los andes centrales”, se ha elaborado un informe referido a la interpretación de las líneas sísmicas C-7050, C-7103 y C-7090-6, conteniendo imágenes con detalle estructural y sedimentario en los reflectores sísmicos más resaltantes. En el sur peruano, la integración con información sísmica del subsuelo se fundamenta en registros estratigráficos costa-adentro y sísmica 2D en costa-afuera de Tacna, los cuales permitieron entender que la arquitectura de las fallas regionales en profundidad y en perfil, por ejemplo, la línea sísmica C-7090-6 corresponde a la dirección de la línea de costa (NO-SE), paralela al rumbo de la Falla Incapuquio.

Para la obtención y procesamiento de datos estructurales y esbozo de la configuración sedimentaria y estructural del offshore del extremo sur peruano, se tuvo a bien interpretar tres (3) líneas sísmicas (Fig. 139), de los cuales dos son perpendiculares a la margen costera del Departamento de Tacna (7050 y 7103) y uno paralela a la línea de costa (7090-6).

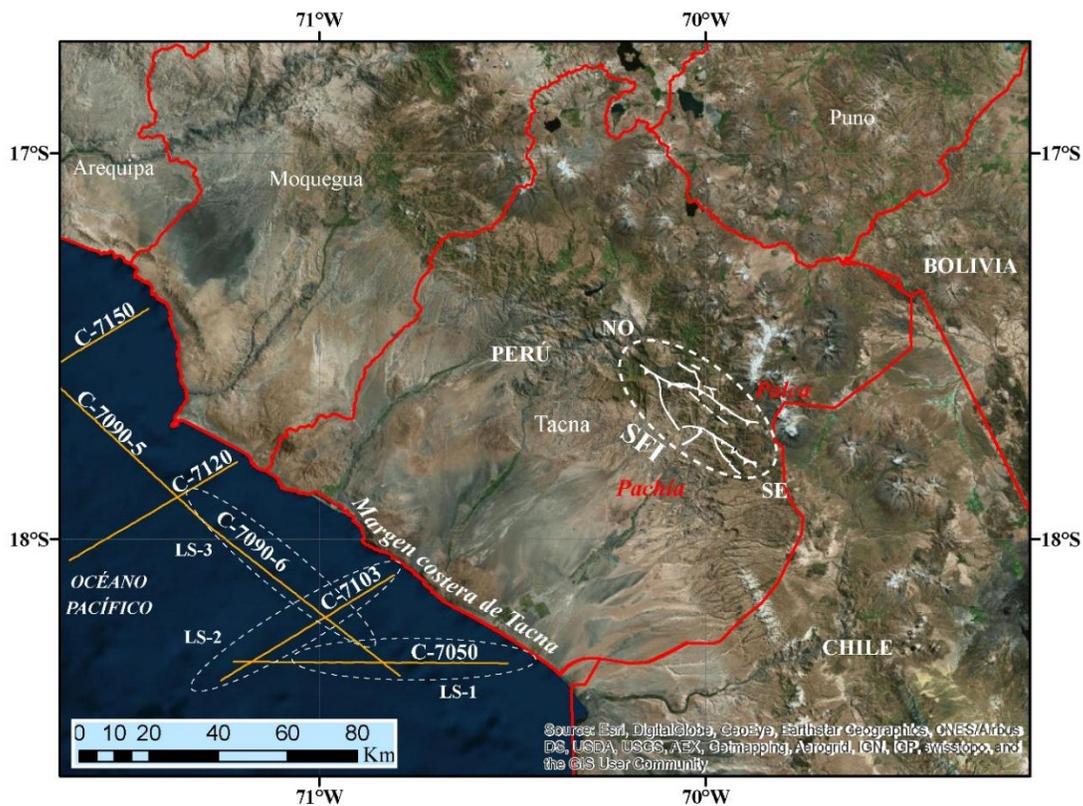


Figura 139: Mapa de las tres líneas sísmicas correspondientes a la margen costera del Departamento de Tacna.

Para la interpretación se consideró las características de facies sísmicas de los datos geofísicos de reflexión de ondas anteriormente mencionadas (Compagnie Generale de Geophysique, CGG para PERUPETRO, 1982).

Con la interpretación de estas líneas sísmicas, la presente investigación pretende tener una idea clara y consistente de las sismofacies presentes en el onshore del extremo sur peruano, y su correspondiente unidad litoestratigráfica de las mencionadas sismofacies en onshore (Grupo Moquegua de Marocco et al., 1985). Así mismo con los datos de las sismofacies, se tratara de esbozar el estilo estructural de esta parte del onshore sur peruano.

4.5.1. LÍNEA SÍSMICA C-7050 (LS-1)

Línea prácticamente de rumbo O-E (Fig. 140), con una distancia aproximada de 75 Km; desde la base E hasta la línea de costa hay una distancia de 7 Km y hasta el área de estudios (sector de Huacano) una distancia de 90 Km; la base E está en la localidad de Boca del Rio (Ver Anexo N°5).

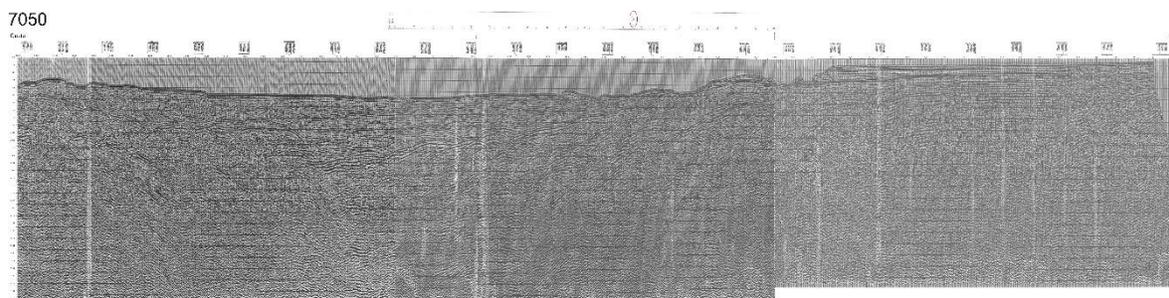


Figura 140: Línea Sísmica C-7050, con orientación O-E y casi perpendicular a la margen costera de Tacna.

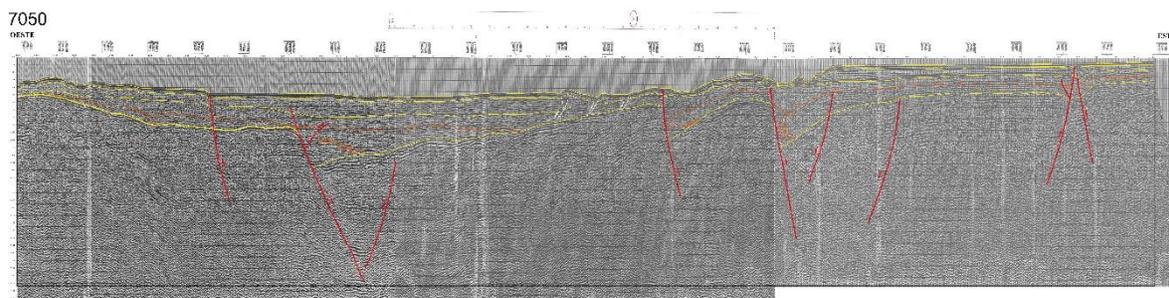


Figura 141: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7050.

En esta línea sísmica predominan componentes típicos de tectónica extensional (Fig. 141), los cuales están representados por terminaciones de semi-grabenos (Fig. 142) abiertos al este. Según la respuesta de facies sísmicas y por correlación con el sector de onshore de la región costanera de Tacna (Grupo Moquegua), se trataría contundentemente de depósitos

cenozoicos (Eoceno-Mioceno) que están descansando en discordancia sobre terrenos jurásicos, probablemente volcano-sedimentarios del arco Chocolate.

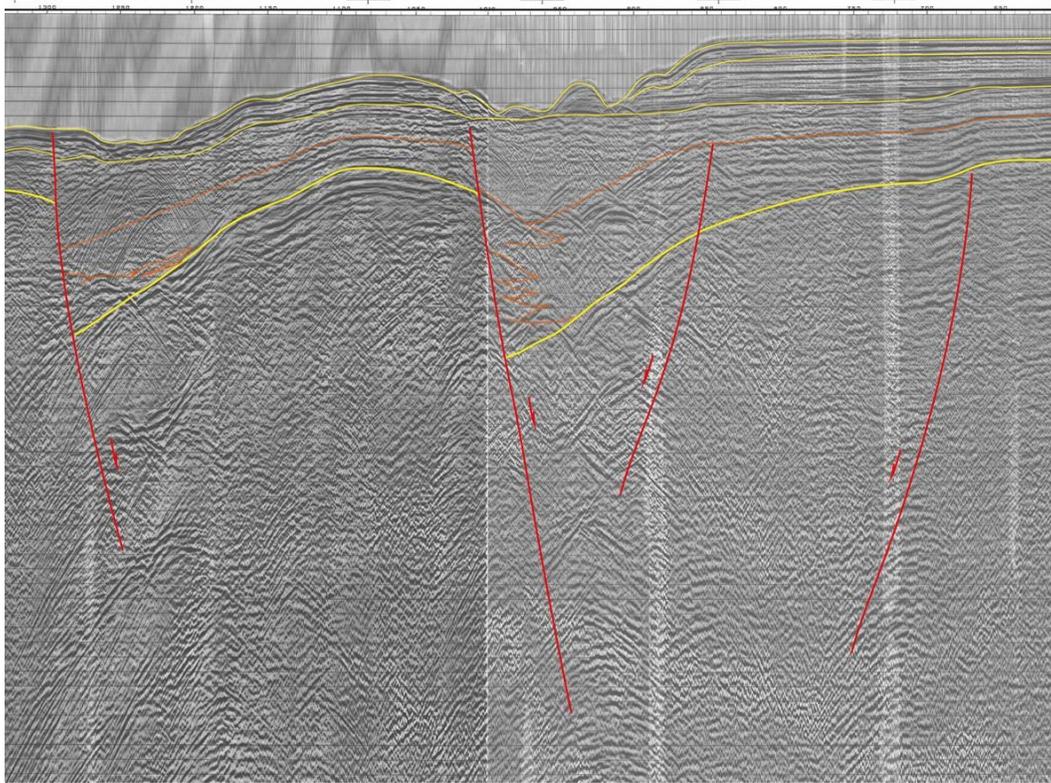


Figura 142: Semi-grabenes interpretados de la Línea Sísmica C-7050, correspondientes a una tectónica extensional.

Esta declaración se basa en las observaciones de las facies sísmicas. Para los términos inferiores, se observa facies sísmicas con reflectores que son caóticas a subparalelos y en algunos sectores disturbados, los cuales confirman su correspondencia a depósitos volcánicos y volcano-sedimentarios, en este caso muy posiblemente corresponderían a rocas volcánicas procedentes del Arco Volcánico Chocolate (Formación Chocolate).

La facies sísmicas que se sobrevienen en la parte media de esta línea con una discordancia muy marcada en algunos sectores (que marcan geometrías tipo onlap) responde a discontinuidades paralelas. Se observan facies de reflectores de paralela gruesa, a ondulada gruesa de alta amplitud con facies tipo hummocky o lenticular. Este tipo de respuesta en las facies sísmicas pueden corresponder a materiales gruesos como conglomerados o arenas en gruesas secuencias. Al pie de las principales fallas, se puede distinguir facies caótica, contorneada a lenticular lo que correspondería a cortos abanicos coluviales. Para estas facies sísmicas, su correspondiente en afloramiento continental para el sector sería el Grupo

Moquegua (muy similar a lo que serían la Unidad MoqC de Sempere et al., 2004). Además de presentarse a manera de facies divergente, nos hacen suponer que se desarrolló bajo un régimen tectónico distensional tipo hemi-graben.

4.5.2. LÍNEA SÍSMICA C-7103 (LS-2)

Línea de rumbo SO-NE (Fig. 143), con una distancia de 56 Km; desde la base NE hasta la línea costera de Tacna hay una distancia de 4 Km y hasta la zona de estudios 95 Km. La base NE se sitúa entre Boca del Rio y Morro de Sama (ver Anexo N°5)

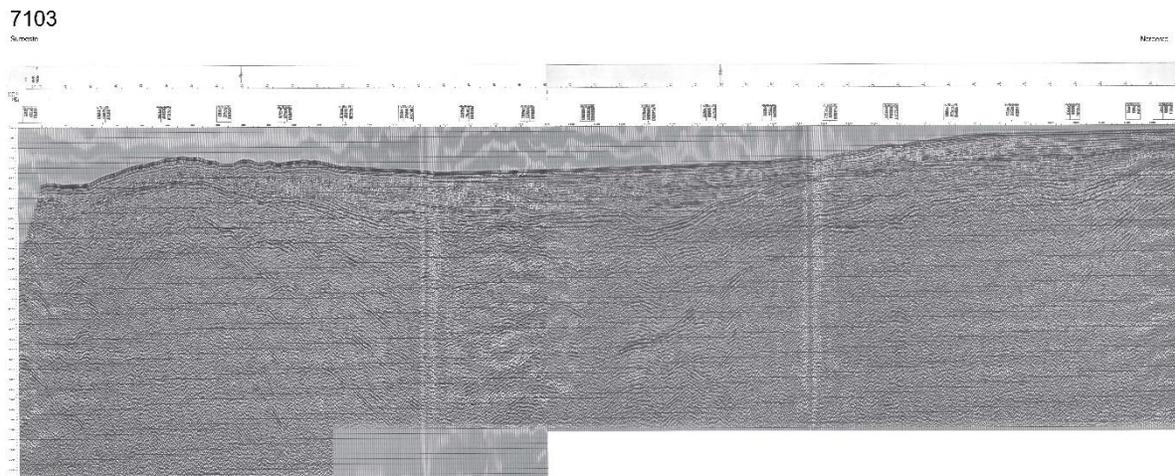


Figura 143: Línea Sísmica C-7103 con orientación SO – NE, perpendicular a la margen costera de Tacna.

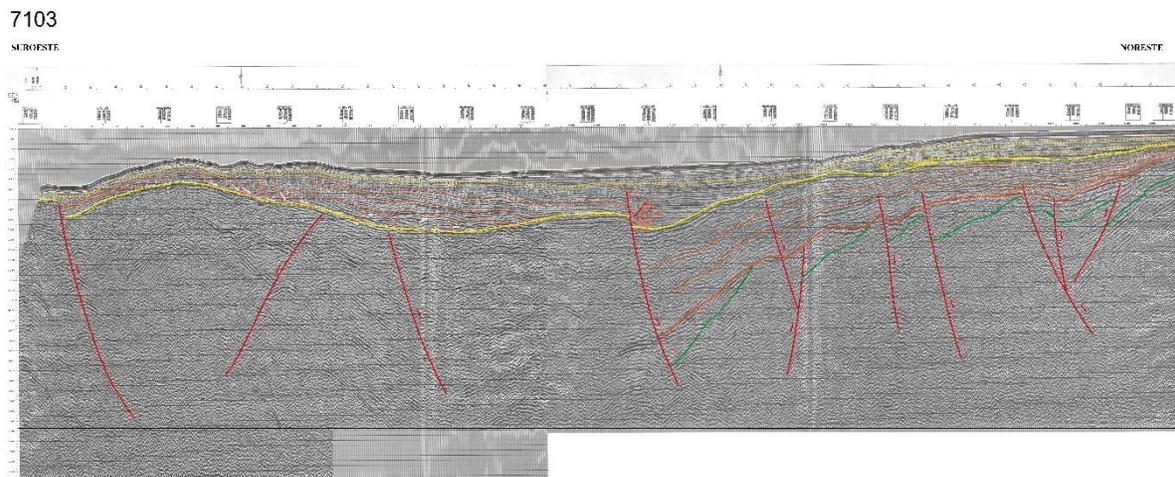


Figura 144: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7103.

En esta línea dominan componentes que son muy típicos de una tectónica extensional (Fig. 144), los cuales configuran hemi-grabens abiertos al Este (Fig. 145). Según la respuesta de estas facies sísmicas y por correlación con el sector de onshore de la región costanera de

Tacna (Grupo Moquegua), se trataría de depósitos cenozoicos (Eoceno-Mioceno), posiblemente de la parte inferior del Grupo Moquegua. Estos yacen en discordancia sobre terrenos jurásicos, probablemente volcánico-sedimentarios del Arco Volcánico Chocolate (Formación Chocolate).

En esta línea sísmica, los términos inferiores las facies sísmicas muestran reflectores que son de caóticas a subparalelas y disturbadas por sectores, y confirman su correspondencia a terrenos volcánicos y volcánico-sedimentarios. En este caso, el probable correspondiente sería los materiales de la Formación Chocolate. La parte media de esta línea, sobre una discordancia muy marcada las facies sísmica responde a discontinuidades paralelas, donde se pueden observar facies de reflectores de paralela gruesa, a ondulada gruesa de alta amplitud con facies tipo hummocky o lenticular. Este tipo de respuesta de facies sísmicas pueden corresponder a materiales gruesos como conglomerados o arenas en gruesas en sucesiones sedimentarias también gruesas. Estos estratos pueden configurarse en cliniformas progradantes (como se observa en las líneas sísmicas) y tienen tendencia al sector suroeste. El correspondiente en afloramiento continental para el sector sería el Grupo Moquegua, además de presentarse a manera de facies divergente no hacen suponer de que se desarrolló en una tectónica distensional con estructuras tipo tipo hemigraben como resultado.

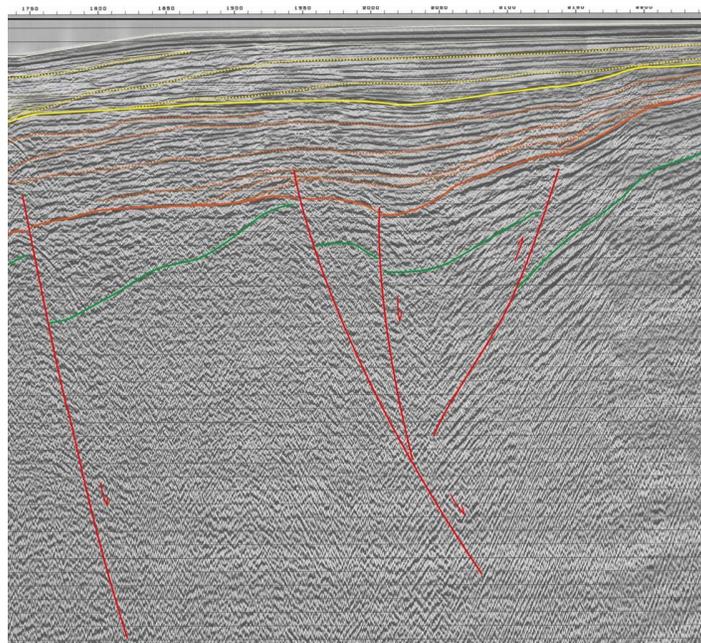


Figura 145: Hemigrabens interpretados de la Línea Sísmica C-7103, correspondientes a una tectónica extensional.

4.5.3. LÍNEA SÍSMICA C-7090-6 (LS-3)

Línea de rumbo NO-SE (Fig. 146) con una distancia de 68 km de extensión; el centro de la LS-3 hacia la margen costera de Tacna hay aproximadamente 26 km, y hasta la zona de estudios 120 Km. La base NE se sitúa aproximadamente paralela a la línea de costa del litoral del departamento de Tacna, al norte de la localidad de Boca del Rio (Ver Anexo N°5).

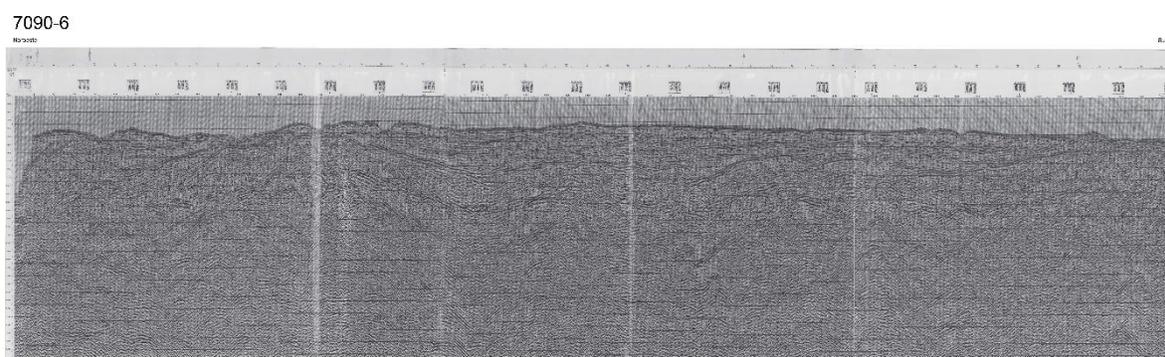


Figura 146: Línea Sísmica C-7090-6 con orientación NO – SE, paralela con la margen costera de Tacna.

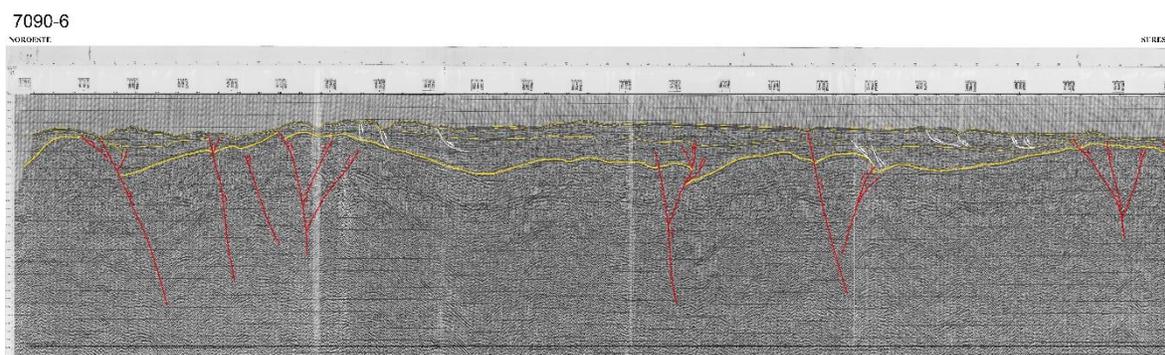


Figura 147: Interpretación estructural y estratigráfica de la Línea Sísmica C-7090-6.

En esta línea abundan componentes estratigráficos y geométricos conspicuos de una tectónica extensional (Fig. 147), los cuales configuran ligeros hemi-grabens abiertos al sureste. En la parte central y sureste de esta línea sísmica se puede distinguir fallas que configuran estructuras en flor positiva (Fig. 148), los que por correlación con el sector de la línea de costa corresponden a la prolongación de las principales quebradas que recortan esta parte de la región de Tacna (fallas con rumbo noreste a suroeste).

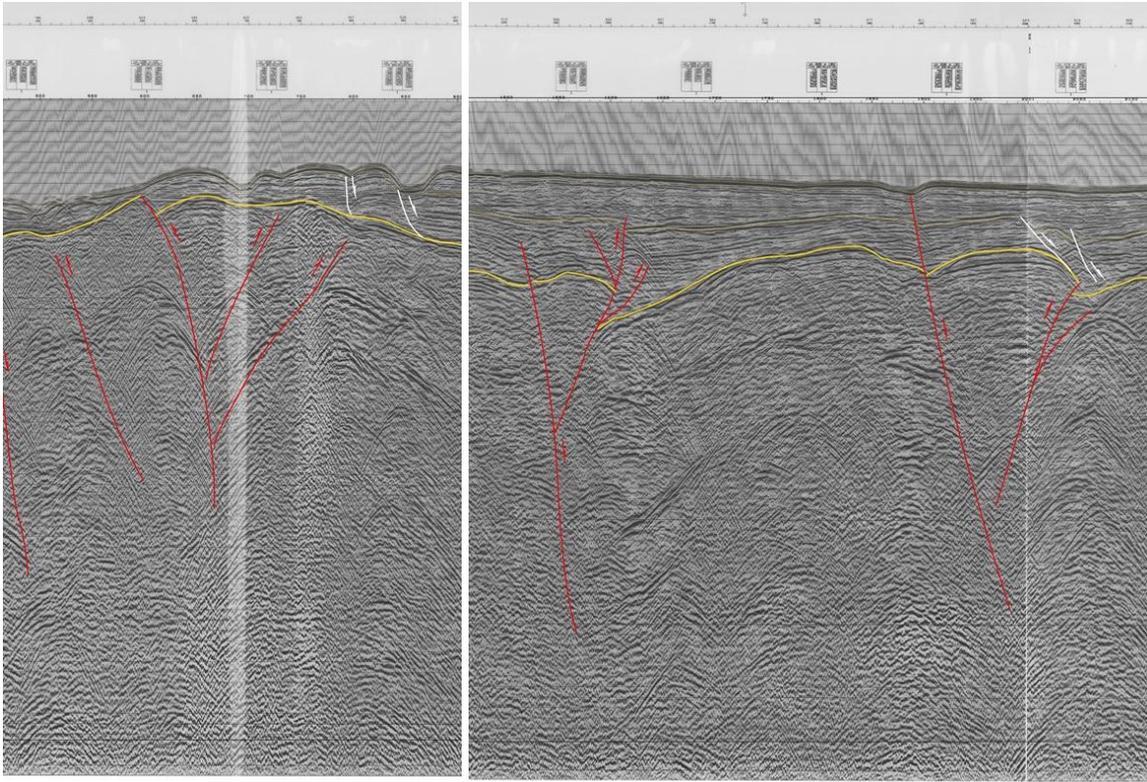


Figura 148: Estructuras en “Flor Positiva” correspondientes al Jurásico.

La configuración de las facies sísmicas en el sector noroeste de la línea, según la respuesta de facies sísmicas y por correlación con el sector de onshore de la región costanera de Tacna, se trataría de depósitos cenozoicos (Eoceno a Mioceno?) que están descansando en discordancia sobre terrenos jurásicos muy probablemente de las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate. Las facies sísmicas donde los reflectores son de geometría caótica y con tendencias al subparalelismo, y disturbadas por sectores, confirman su correspondencia a rocas volcánicas y volcano-sedimentarias. En este caso el probable correspondiente sería los depósitos de la Formación Chocolate.

La sísmica interactuando con la microtectónica da como resultado la interpretación de la Cuenca Mesozoica Arequipa desde sus inicios (Fig. 149) donde predominaban regímenes tectónicos distensivos que controlaron la sedimentación durante el jurásico, que posteriormente debido a una inversión tectónica se convirtieron en fallas inversas hasta dar lugar al sistema estructural actual que comienza a inicios del Cenozoico.

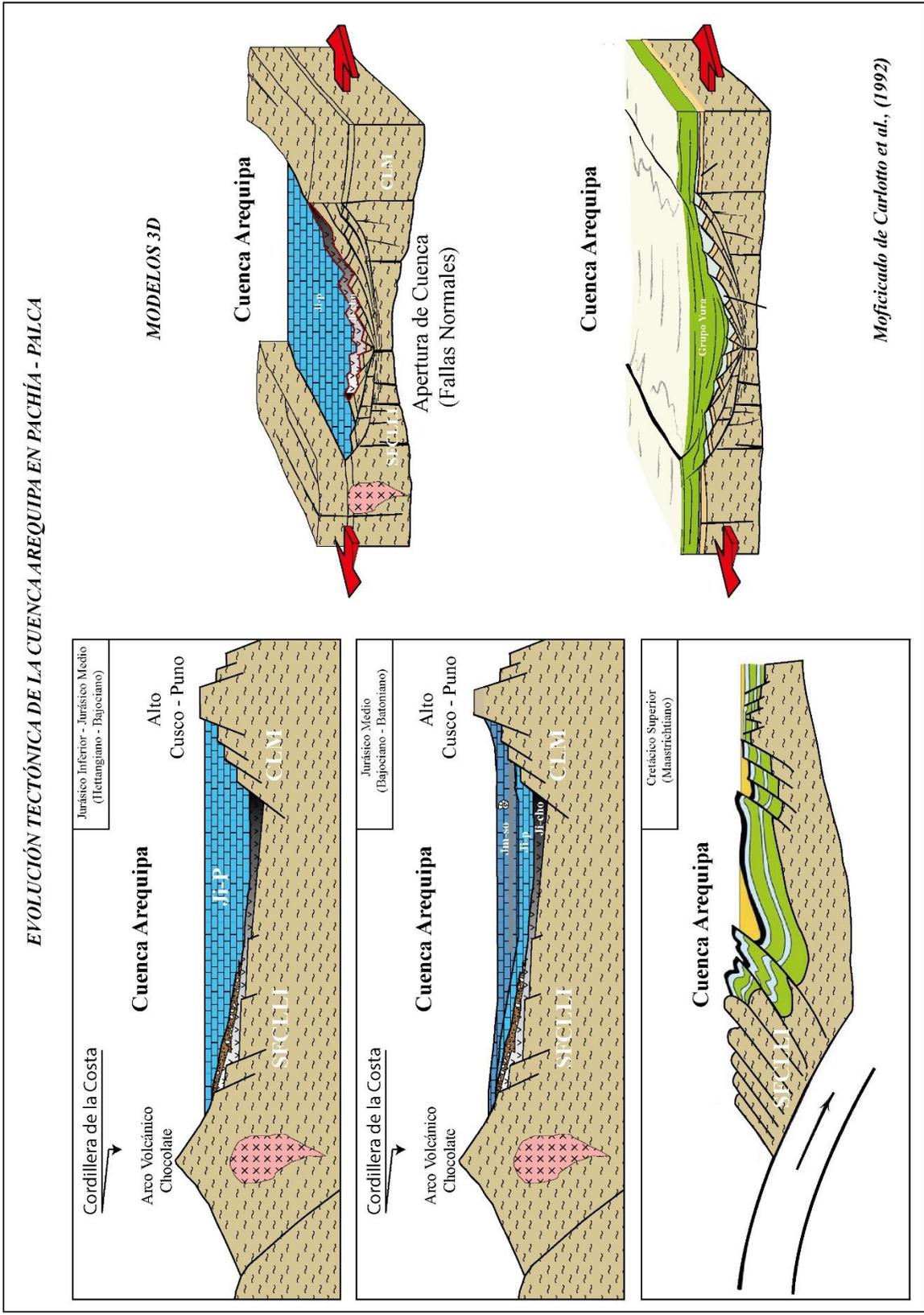


Figura 149: Evolución tectónica de la Cuenca Mesozoica Arequipa en la región de Tacna.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.CONCLUSIONES

- La Cuenca Arequipa tuvo sus inicios de formación en el Jurásico inferior conjuntamente con el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) que inicialmente tuvo un régimen distensivo, esto se corrobora los datos de microtectónica tomados en rocas mesozoicas en los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x).

- Las estructuras que predominan en el sur peruano (Tacna) son transcurrentes (Fallas inversas con componente de rumbo sinistral), encontrándose relacionada a este mismo sistema plegamientos anticlinales paralelos a estas fallas, mientras que en Tocuco existen fallas normales de alto ángulo debido a la tectónica extensiva predominante en rocas jurásicas y cretácicas.

- Las microestructuras relacionadas al SFI analizadas en secciones delgadas son: Sombras de presión, Estilolitas, Boudinage; mientras que las asociadas a distensión son (fracturas de tensión, fracturas anastomasadas).

- Se realizó 38 Estaciones Microtectónicas (EM) ubicadas espacialmente en tres sectores correspondientes a los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x): Palca y alrededores, Huacano y Tocuco.

- Se elaboró 38 diagramas correspondientes a cada una de las Estaciones Microtectónicas, luego teniendo en cuenta el criterio de los patrones direccionales de los paleoesfuerzos se agrupó en 5 eventos regionales:
 - Primer evento: Distensión NO-SE (Ji - Jm).
 - Segundo evento: Transtensión N-S (Bajociano - Bathoniano).
 - Tercer evento: Transtensión E-O (Js - Ki).
 - Cuarto evento: Compresión NO-SE (Inversión Tectónica) (Ki - Ks).
 - Quinto evento: Transpresión NNE (Fallas IxSx) (Ks-P).

- La interpretación de líneas sísmicas corroboran que tectónicamente los terrenos corresponden a una tectónica extensional, que configuran hemigrabens sobre terrenos antiguos como el Jurásico, sobre el que deviene rellenando sucesiones sedimentarias correspondientes al Eoceno a Oligoceno inferior.

- Las fallas interpretadas mediante líneas sísmicas del Offshore de Tacna son profundas durante el Jurásico, que posteriormente se reactivaron en un evento de inversión tectónica en el Cretácico Superior y dio como resultado la exhumación de bloques antiguos.

5.2.RECOMENDACIONES

- Aplicar dataciones radiométricas en fallas mediante el método (U-Th)/He con la finalidad de tener una edad absoluta de los esfuerzos que han generado las principales estructuras geológicas en el sur del Perú (Tacna).
- Profundizar el estudio de los métodos fractales y su aplicabilidad a la geología estructural, ya que unos de los principios fundamentales de esta teoría es la invariabilidad de estructuras en diferentes escalas.
- Tomar datos microtectónicos alrededor del perímetro del supuesto rombo estructural, para verificar su existencia.
- Cartografiar con mayor detalle (1:25,000) la Unidad Milonita en el sector de Huacano, Quebrada Teninguirre y Quebrada Tauja para verificar la extensión de esta unidad y relacionarlo con la magnitud de los esfuerzos tectónicos que la han generado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H., Benavente, C., Peña, F., Cotrina, G., Alván, A. & Torres, P. (2008). Estudio Geológico del Valle del Rio Caplina, Tacna-Perú. Convenio INGEMMET y PET, 95 p.
- Acosta, H. (2009). Nuevos aportes en la Sedimentación y Paleontología de las Formaciones Chocolate y Socosani (Jurásico Inferior a Medio) en el distrito de Yura, Arequipa (Sur de Perú). Volumen Especial N° 7 Víctor Benavides Cáceres, 63-78.
- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Oviedo, J., Rodríguez, J. (2010). Actividad tectónica del sistema de fallas Incapuquio durante la formación de la cuenca Arequipa en el Jurásico, 4 p.
- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Oviedo, J. & Rodríguez, J. (2011). Geología de los Cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x). Boletín N° 139 Serie A, Carta Geológica Nacional, 101 p.
- Acosta, H., Rodríguez, J., Ccallo, W., Cutipa, M., 2012. Actividad tectónica del sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio durante el Cretácico y Paleógeno en el Sur del Perú. XVI Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos, SGP.
- Allmendinger, R. (2015). Modern Structural Practice. A structural geology laboratory manual for the 21 Century. Chapter 6, p. 106-129.
- Alván, A. (2009). Relación de las facies sedimentarias y de los ammonites del Jurásico inferior a medio entre Yura (Arequipa) y Palquilla (Tacna). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 136 p.
- Alván, A. (2015). Geodynamic significance of the Cenozoic deposits in the southern Peruvian forearc (16°25'S to 17°15'S): constraints by facies analysis and desiment provenance. Göttingen, 182 p.
- Anderson, E.M. (1951). The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Brittan, Edinburgh, Oliver and Boyd, 241 p.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction in Hancock, P.L. (ed), Continental Deformation: Oxford, Pergamon Press, p. 53-100.

- Angelier, J. & Mechler, P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie, la méthode des dièdres droits. Bull. Soc. Géol. France. Vol. 7. Tomo XIX. N°6.
- Babín Vich, R.B. & Gómez, D. (2010). Problemas de geología Estructural. Cap. 8, Fallas. Serie geología Estructural N° 2, p. 124-147.
- Barnsley, M., Devaney, R., Mandelbrot, B., Peitgen, H., Saupe, D. & Voss, R. (1988). The Science of Fractal Images. Springer – Verlag, New York, 312 p.
- Barúa, V. (1961). Reconocimiento Geológico – Zona de Tacna y Moquegua. Sociedad Geológica del Perú. Segundo Congreso Nacional de Geología. Anales-parte I, p. 35-59.
- Bellido, E. & Guevara, C. (1963). Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Cledesí (Hojas 35-s y 35-t). Comisión Carta Geológica Nacional. Boletín N° 5, 92 p.
- Belousov, V. (1979). Geología Estructural. Editorial Mir, Traducido del ruso por el ingeniero V. Llanos, segunda edición, 307 p.
- Benavente, C. (2008). Estratigrafía y Neotectónica en el Antearco del Sur del Perú-Región Tacna. Universidad San Antonio Abad del Cusco, 152 p.
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa. Sociedad Geológica del Perú. Boletín N° 38, p. 5-63.
- Billings, M. (1965). Geología Estructural. Segunda edición, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 564 p.
- Blanquat, M., Tokoff, B., Teysier, C. & Vignerese, J.L. (1998). Transpressional Kinematics and magmatic arcs. Geological Society, London, Special Publications 135, p. 327-3440.
- Blenkinsop, T. (2002). Deformation Microstructures and Mechanisms in Mineral and Rocks. Kluwer Academic Publishers, 157 p.
- Bons, P. (2012). A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. Journal of Structural Geology N° 43, p. 33-62.
- Camargo, J. (2015). Fallas y Fallamiento. Universidad Surcolombiana, 94 p.
- Carlier, G., Carlotto, V., Lorand, J.P., Liegeois, J.P., Fornari, M., Soler, P., Cárdenas, J., 2006. Magmatismo y Estructuras cenozoicas en el Altiplano Sur Peruano: Implicancias Geodinámicas. XIII Congreso Peruano de Geología. SGP.

- Carlotto, V. (2013). Paleogeographic and Tectonic control on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Tectonophysics* 589, p. 195 – 219.
- Carlotto, V., Rodríguez, R., Acosta, H., Cárdenas, J. & Jaillard, E. (2009). Alto Estructural Totos-Paras (Ayacucho): Límite Paleogeográfico en la Evolución Mesozoica de las cuencas Pucará (Triásico Superior-Liásico) y Arequipa (Jurásico -Cretácico). Volumen Especial N°7 Victor Benavides Cáceres, p. 1-46.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani,., Diaz-Martínez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S. & Cueva, E. (2009). Dominios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú* N° 103, p. 1-89.
- Chávarri, E., Pino, E., Espíritu, G., Gonzales, F. & Villanueva, E. (2010). Evaluación de Recursos Hídricos – Cuencas de los ríos Locumba y Sama. Vol. I, 145 p.
- Coe, A., Argles, T., Rothery, D. & Spicer, R. (2010). *Geological Field Techniques*. Department of Earth and Environmental Sciences, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes, UK, 337 p.
- Cooper, M., Williams, G., Graciansky, P., Murphy, R., Needham, T., de Paor, D., Stoneley, R., Tood, S., Turner, J. & Ziegler, P. (1989). *Inversion Tectonics*. Geological Society Special. Publications N° 44, 335-347.
- Davila, J. (2011). *Diccionario Geológico*. INGEMMET. Arthaltuna. Grouting, Geotechnical & instrumentation, 901 p.
- De Vicente, G., Muñoz, A. & Giner, J.L. (1992). El uso del método de los diedros rectos: Implicaciones a partir del modelo de deslizamientos del análisis poblacional de fallas. *Rev. Soc. Geol. España*, p. 6-19.
- Doblas, M. (1998). Slickenside Kinematic indicators. Elsevier. *Tectonophysics* 295, p. 187-197.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. University of Bergen, Norway. Cambridge University Press. 480 p.
- Gumiel, P. (1996). Fractales, Su importancia en Geología. Simulación de patrones fractales naturales. Madrid, p. 1382-1384.
- Gumiel, P., Campos, R., Hernández, J.R. & Paredes, C. (1996). Características de la geometría fractal de varios sistemas filonianos mineralizados del Macizo Hespérico. Su

- aplicación a la prospección. Parte I: Mineralizaciones de Oro. Geogaceta N° 20, p 1397 – 1400.
- Jacay, J., Sempere, T., Husson, L. & Pino, A. (2002). Structural Characteristics of the Incapuquio Fault System, Southern Perú. 3 p.
- Jacay, J. & Sempere, T. (2004). Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento del Sur del Perú. Publicacion Especial N° 5. Sociedad Geológica del Perú-Institut Recherche Pour Le Développement, 232 p.
- Jaén, H. (1965). Geología del Cuadrángulo de Tarata. Boletín. Serie A: Comisión Carta Geológica Nacional; 90 p.
- Jaén, H. & Ortíz, G. (1963). Geología de los Cuadrángulos de La Yarada y Tacna (Hojas 37-u y 37-v). Comisión Carta Geológica Nacional. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°6, 54 p.
- Jaillard, E., Hérial, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Baby, P., Lavenu, A. & Dumont, J.F. (2000). Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile. Sociedade Brasileira de Geologia 31 International Geological Congress-Rio de Janeiro, p. 481-546.
- Jenks, W. (1946). Tertiary and Quaternary vulcanismo in southern Peru. Geological Society of America Bulletin, vol. 57, N° 12, part 2, 1209.
- Jenks, W. (1948). Geología de la hoja de Arequipa al 200, 000. Geology of the Arequipa Quadrangle of the Carta Nacional del Perú. Instituto Geológico del Perú. Boletín N° 9, 204 p.
- Laughlin, A., Damon, P. & Watson, B. (1968). Potassium-argon dates from Toquepala and Michiquillay, Perú. Economic Geology. Vol. 63, p. 166-168.
- Mamani, M., Carlotto, V., Santos, A., Acosta, H., Rodríguez, R., Jaimes, F., Martianera, R., Rodríguez, J., Navarro, J., Cacya, L., Alván, A., Cornejo, T., Peña, D & Aguilar, R. (2010). Base de Datos Nacional de Anomalías de Bouguer y su correlacion con los Dominios Geotectónicos del Perú. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Cusco, p. 788-791.
- Mandelbrot, B. (1975). The Fractal Geometry on Nature. Library of Congress Cataloging in Publication Data. 468p.

- Marocco, R., Delfaud, J., Lavenu, A., 1985. Ambiente deposicional de una cuenca continental intramontaña andina: el Grupo Moquegua (sur de Perú) primeros resultados. *Sociedad Geológica del Perú*, No. 75, p. 73-90.
- Martínez, J. (2003). *Geología Estructural y Dinámica Global*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. 431 p.
- Martínez, W., Cervantes, J., Romero, D. & Sempere, T. (2005). The late Paleozoic – Early Mesozoic Chocolate Formation of Sothern Peru: New data and interpretations. 6 th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts, p. 490-492.
- McClay, K. (1990). Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies. *Marine and Petroleum Geology*, v. 7, p. 206-233.
- McClay, K. & Bonora, M. (2001). Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin* 85/2, p. 233-260.
- Megard, F., Noble, D., McKee, E. & Bellon, H. (1984). Multiple pulses of neogene compressive deformation in the Ayacucho intermontane basin, Andes of central Perú. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 95, N° 9, p. 1108-1117.
- Mitchum, R., Vail, P. & Sangree, J.B. (1977). Seismic Stratigraphy and global Changes of sea level, part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.* 26, P. 117-133.
- Monge, R. & Cervantes, J. (2000). *Memoria Explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Pachía y Palca*.
- Muñoz, A. & De Vicente, G. (1988). Estado de esfuerzos en la corteza. *Técnicas y métodos de Análisis Poblacional de Fallas*, 22 p
- Newell, N. (1945). *Investigaciones Geológicas en las zonas circunvecinas al Lago Titicaca*. *Sociedad Geológica del Perú*. Boletín N° 18, p. 44-68.
- Norabuena, E., Timothy, H., Stein, S. & Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, N° 22, p. 3405-3408.
- Oncken, O., Chong, G., Frans, G., Giese, P., Jürgen Gotze, H., Ramos, V., Strecker, M. & Wiegger, P. (2006). The Andes, Active Subduction Orogeny. *Central and Southern Andean Tectonic Evolution Inferred from Arc Magmatism*; p. 333-348.

- Passchier, C. & Trouw, R. (2005). *Microtectonics*. Second edition and enlarged edition. With 322 images. Springer, 371 p.
- Pérez, R. (2003). *Sobre la Teoría del Caos aplicada en Sismotectónica: Geometría Fractal de Fallas y Terremotos*. Madrid, 398 p.
- PERUPETRO, 2003. *Peruvian Petroleum, A Renewed exploration opportunity*. Lima, Perú, PERUPETRO, 159 p.
- Petit, J. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, Vol.9, N°. 5/6, p. 597-608.
- Pino, A., Sempere, T., Jacay, J. & Iannuzzi, R. (2002). Nuevos aportes geológicos en el estudio de la evolución geodinámica de la cordillera de los Andes en el Sur del Perú: área Mal Paso-Palca (Tacna). XI Congreso Peruano de Geología. Trabajos científicos. SGP, p. 1 - 14.
- Pino, A. (2003). *Estratigrafía y Paleogeografía del intervalo Paleozoico Superior-Cretácico inferior en el extremo Sur del Perú (Area Mal Paso-Tacna)*; 144 p.
- Pino, A., Sempere, T., Jacay, J., Fornari, M. (2004). *Estratigrafía, Paleogeografía y Paleotectónica del Intervalo Paleozoico Superior – Cretáceo Inferior en el Área de Mal Paso – Palca (Tacna)*. Publicación Especial SGP (2004), p. 15 – 44.
- Quispe, J.L. (2006). *Características Estructurales e Isótopos de Plomo de las mineralizaciones Auríferas de la Franja Huaytará-Tantará, Huancavelica (Perú)*. Máster Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, 146 p.
- Ramos, V. (1989). The Birth of Southern South America. *American Scientist*, Volume 77. P. 444 – 450.
- Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. New York, McGraw Hill, 576 p.
- Ramsay, J.G. (1977). *Plegamiento y fracturamiento de las rocas*. Madrid: H. Blume Ediciones, 590 p.
- Rodríguez, R. (2010). *Análisis e Interpretación de Fallas, Curso teórico-práctico de Geología Regional y SIG aplicado a la exploración de yacimientos magmático-hidrotermales*. 29 p.
- Rodríguez, R., Acosta, H., Cueva, E., Carlotto, V., 2010. *Dominios e Estilos Estructurales en el Altiplano y borde Oeste de la Cordillera oriental del Sur del Perú*. XV Congreso

- Peruano de Geología, Resúmenes extendidos SGP. Publicación Especial N° 9 (2010), Cusco p. 810 – 813.
- Rowland, M., Duebendofer, E. & Schiefelbein, I. (2007). *Structural Analysis & Synthesis- A Laboratory course in Structural Geology*. Third Edition. 322 p.
- Salinas, E. (1983). *Paleogeografía y Sedimentología de la etapa de Individualización de la Cuenca Andina Externa (Mesozoica) en el Sector de Palquilla (NE de Tacna)*. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 174 p.
- Salinas, E. (1987). *Evolución Paleogeográfica del Sur del Perú a la luz de los Métodos de Análisis Sedimentológico de las Series del departamento de Tacna*. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 303 p.
- Sébrier, M., Lavenue, A., Fornari, M. & Soulas, J.P. (1988). *Tectonics and uplift in Central Andes (Perú, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present*. *Géodynamique*, v.3, p. 85-106.
- Sempere, T. (2004). *Las “FASES TECTONICAS” en los Andes Centrales: Esplendor y Decadencia de un Paradigma Geológico*. Publicación especial SGP N°5 p. 203 – 216.
- Sempere, T., Carlier, G., Soler, P., Fornari, M., Carlotto, V., Jacay, J., Arispe, O., Néraudeau, D., Cárdenas, J., Rosas, S. & Jiménez, N. (2002). *Late Permian-Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics*. *Tectonophysics-Elsevier*, p. 153-181.
- Sempere, T., Jacay, J., Fornari, M., Roperch, P., Acosta, H., Bedoya, C., Cerpa, L., Flores, A., Husson, L., Ibarra, I., Latorre, O., Mamani, M., Meza, P., Odonne, F., Orós, Y., Pino, A & Rodríguez R. (2002). *Lithospheric-scale Transcurrent Faults Systems in Andean Southern Peru*, p. 601-604.
- Sempere, T., Jacay, J., Pino, A., Bertrand, H., Carlotto, V., Fornari, M., García, R., Jiménez, N., Marzoli, A., Meyer C., Rosas, R. & Soler, P. (2004). *Estiramiento litosférico del Paleozoico superior a cretáceo medio en el Perú y Bolivia*. Publicación Especial SGP N°5, p. 45-79.
- Sempere, T., Fornari, M., Acosta, J., Flores, A., Jacay, J., Pena, D., Roperch, P., Taipe, E., 2004. *Estratigrafía, geocronología y paleotectónica de los depósitos de antearco del sur del Perú*. XII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, p. 533-536.

- Steinmann, G. (1929). *Geología del Perú*. Heidelberg. Carl Winters. Universitat Buchhandlung. 448 p.
- Tomás, R., Ferreiro, I., Sentana, I. & Díaz, C. (2002). Aplicaciones de la proyección estereográfica en Ingeniería Geológica. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica (2002), España, 10 p.
- Trouw, R., Passchier, S. & Wiersma, D. (2010). *Atlas of Mylonites and related microstructures*. Springer, 305 p.
- Twiss, R. Moores, E. (2007). *Structural Geology*. Second edition. W.H. Freedman and Company. New York, 742 p.
- Vega, M. (2002). La Cuenca de Antearco del Sur del Perú: Dinámica de la Sedimentación y contexto Geodinámico de la Formación Camaná y sus equivalentes Off-Shore, 185 p.
- Vicente, J.C. (1981). Elementos de la Estratigrafía Mesozoica Sur Peruana. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico. Vol. 1, p. 319-351.
- Vicente, J.C., Sequeiros, F. & Valdivia, S. (1979). El sobre-escurrimiento de Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor Andino al NW de Arequipa (1979). IV Congreso Peruano de Geología, Arequipa p. 67-99.
- Vicente, J.C. (1989). Early Late Cretaceous Overthrusting in the Western Cordillera of Southern Perú. *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, V.11*, p. 1-23.
- Waldron, J. (2005). Extensional fault arrays in strike-slip and transtension. *Journal of structural Geology* 27, p. 23-34.
- Wilson, J., & García, W. (1962). *Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca* (Hojas 36-v y 36-x). Comisión Carta Geológica Nacional. Vol. II; 1-87.
- Wipf, M. (2006). *Evolution of the Western Cordillera and Coastal Margin of Perú: Evidence from low-temperature Thermochronology and Geomorphology*. Zürich, 163 p.
- Zlotnik, S., Jacovkis, P. & Cristallini, E. (2002). Modelamiento numérico de estructuras y deformación de rocas mediante el método de elementos discretos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, 71 p.